



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE QUÍMICA**

JEFERSON DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS:
APLICAÇÃO DE CONCEITOS MECANOQUÍMICOS**

**CAMPINAS
2016**

JEFERSON DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS:
APLICAÇÃO DE CONCEITOS MECANOQUÍMICOS**

**Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de
Química da Universidade Estadual de Campinas como parte
dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em
Química na área de Físico-Química**

Orientador: Prof. Dr. Fernando Galembeck

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO JEFERSON DOS SANTOS, E ORIENTADA PELO
PROF. DR. FERNANDO GALEMBECK.**

**CAMPINAS
2016**

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca do Instituto de Química
Danielle Dantas de Sousa - CRB 8/6490

Santos, Jeferson dos, 1970-
Sa59c Caracterização de resíduos de rochas ornamentais : aplicação de
conceitos mecanoquímicos / Jeferson dos Santos. – Campinas, SP : [s.n.],
2016.

Orientador: Fernando Galembeck.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de
Química.

1. Rochas ornamentais. 2. Caracterização. 3. Resíduos. 4. Mecanoquímica.
I. Galembeck, Fernando. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de
Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Characterization of ornamental rocks stones : application of
mechanochemical concepts

Palavras-chave em inglês:

Ornamental rocks

Characterization

Wastes

Mechanochemistry

Área de concentração: Físico-Química

Titulação: Mestre em Química na área de Físico-Química

Banca examinadora:

Fernando Galembeck [Orientador]

Maria do Carmo Gonçalves

Walter Ruggeri Waldman

Data de defesa: 30-11-2016

Programa de Pós-Graduação: Química

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando Galembeck (Orientador)

Prof. Dr. Walter Ruggeri Waldman (UFSCar)

Profa. Dra. Maria do Carmo Gonçalves (IQ-UNICAMP)

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Este exemplar corresponde à redação final da
Dissertação de Mestrado defendida pelo aluno
JEFERSON DOS SANTOS, aprovada pela
Comissão Julgadora em 30 de novembro de 2016.

À minha esposa Valdete e meus filhos, Jeferson Jr e Ana Julia.

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Ao professor Fernando Galembeck, que me proporcionou momentos de profunda reflexão científica e profissional instigando-me à pergunta e à pesquisa, além de sua dedicação e zelo pelo ensino e orientação.

A todos do laboratório D208, pela parceria em experimentos e discussões.

A todos os funcionários que me ajudaram direta ou indiretamente neste trabalho.

Ao aluno de Doutorado Camilo Bruno Ramos de Jesus do IF pela ajuda e apoio no método Rietveld.

Aos funcionários da empresa Marmoraria Ico de Salto pela dedicação e ajuda na obtenção e coleta das amostras.

À minha família que sempre me apoiou nos momentos fáceis e difíceis e está junto a mim na alegria de poder realizar um sonho que uma segunda chance proporciona.

RESUMO

As rochas ornamentais são utilizadas na construção civil no revestimento de pisos, paredes e na produção de pias, balcões e assemelhados. Durante o processamento dessas rochas são gerados resíduos minerais que podem atingir 80% de perdas. Neste trabalho, resíduos dos processos de corte e de britagem de resíduos do granito Cinza Corumbá foram caracterizados por análise granulométrica, determinação de área superficial, espectroscopia no infravermelho, difração e fluorescência de Raios-X, microscopia eletrônica de varredura e adsorção de azul de metileno. Os minerais quartzo, microclínio, oligoclásio, andesina, biotita, titanita e magnetita foram encontrados nas frações dos pós obtidos tanto na serragem como na britagem, porém em diferentes proporções. Na análise elementar determinou-se a presença de Si, Al, Na, K, Ca, Fe, Mg e Ti. Nos espectros de infravermelho identificou-se a presença de bandas atribuídas às ligações Si-O do quartzo e silicatos. Adicionalmente, o material britado apresentou bandas referentes às ligações C-H, proveniente do óleo lubrificante do britador. Na microscopia eletrônica observou-se que as partículas do pó de brita são mais irregulares que as do pó de corte. A área superficial do pó de brita ($2,85 \text{ m}^2/\text{g}$) é maior que a do pó de corte ($1,98 \text{ m}^2/\text{g}$). O pó de brita é hidrofóbico devido à contaminação com o óleo lubrificante usado no britador, enquanto o pó de corte é hidrofílico. A adsorção de azul de metileno é duas vezes e meia maior no pó de britagem do que no pó de corte. Estes resultados mostram que os pós obtidos por corte e britagem, apesar de serem constituídos dos mesmos minerais, apresentam propriedades superficiais diferentes.

ABSTRACT

Processing ornamental rocks produces up to 80% weight residues, which may become an environmental problem. In this work, we analyzed residual powders from cutting and crushing Cinza Corumbá granite, to study the influence of mechanical processes in the properties of the residues. The powders were characterized by X-ray diffraction and fluorescence, infrared spectroscopy, scanning electron microscopy, surface area determination and adsorption of methylene blue. The same elements (Si, Al, Na, K, Ca, Fe, Mg e Ti) and minerals (quartz, microcline, oligoclase, andesine, biotite, titanite and magnetite) are found in both powders but the powders formed by crushing contain oil residues, from the lubricant used in the crusher. Particle shapes of the crushed powder (surface area $2.85 \text{ m}^2/\text{g}$) are more irregular than cut powder (surface area $1.98 \text{ m}^2/\text{g}$). Adsorption of methylene blue is lighter in the crushed powder than in the cutting powder. The cutting powder is hydrophilic while the crushed powder is hydrophobic due to the incorporation of crushing oil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aplicação de rochas ornamentais como revestimento de uma escada revestida em mármore branco clássico.	17
Figura 2: Aplicação de rochas ornamentais como peças decorativas em tabuleiro de xadrez em granito café, granito tabaco, calcário e pedra sabão.	18
Figura 3: Aplicação de rochas ornamentais como peças estruturais em muro, arco e escada de granito Vermelho Salto.	18
Figura 4: Ladrilhos de pedra miracema com dimensões de 23,0X11,5X1,5cm utilizado em revestimento de calçadas.	19
Figura 5: Pia de cozinha produzida em granito Cinza Corumbá.	22
Figura 6: Lavatório de banheiro produzido em mármore Branco Espírito Santo.	24
Figura 7: Bancos e mesa produzidos em ardósia cinza.	25
Figura 8: Revestimento de borda e piso externo de uma piscina com quartzito São Tomé.	26
Figura 9: Piso revestido com serpentinito verde.	27
Figura 10: Pilões de esteatito (pedra sabão).	28
Figura 11: Ocorrência e extração de mármore Carrara em maciço rochoso.	29
Figura 12: Ocorrência de rochas ornamentais na forma de matacões em jazida de granito Vermelho Salto.	29
Figura 13: Extração de bloco de mármore em maciço rochoso.	30
Figura 14: Serragem de bloco de rochas ornamentais por tear multilâmina.	31
Figura 15: Serragem de bloco de rochas ornamentais por tear multifio.	32
Figura 16: Processo de polimento de chapas de granitos com politriz automática. ...	32
Figura 17: Acabamento de borda via úmido com lixadeira manual pneumática.	33
Figura 18: Quadro representativo da evolução das exportações brasileiras de rochas ornamentais 1998 a 2015.	34
Figura 19: Estimativa do volume de resíduos gerados na indústria de rochas ornamentais (modificado de CAMPOS et al., 2014).	37
Figura 20: Resíduos de rochas ornamentais da fase de lavra.	38
Figura 21: Descarte da lama de serragem e polimento de rochas ornamentais nas proximidades de um córrego na cidade de Vitória-ES.	40
Figura 22: Tanque de decantação de resíduos de rochas gerados no setor de marmoraria.	41

Figura 23 Resíduos de retalhos de rochas gerados no setor de marmoraria.....	41
Figura 24: Reutilização de pedaços de bloco de granito para fabricação de pontes.	43
Figura 25 Amostra de granito Cinza Corumbá polido.....	44
Figura 26: Campos de estabilidade dos principais polimorfos cristalinos naturais de SiO ₂ em função da temperatura e da pressão listostática.....	46
Figura 27: Tetraedros de SiO ₂ no quartzo.....	46
Figura 28: Estrutura tridimensional do quartzo.....	47
Figura 29: Esquema de representação por fórmulas da substituição de cátions Si ⁴⁺ por Al ³⁺ nos feldspatos.	49
Figura 30: Diagrama de fases ternário – nomenclatura dos principais silicatos.....	50
Figura 31: Estrutura básica de um feldspato.....	51
Figura 32: Amostra de feldspato com faces retas, clivagem de 90° e hábito tabular.	51
Figura 33: Representação da estrutura da mica biotita.....	53
Figura 34: Amostra de mica enfatizando o hábito foliado ou micáceo.	53
Figura 35: Possíveis mecanismos de fratura durante a fragmentação de rochas.	60
Figura 36: Esquema de um britador de mandíbulas.....	61
Figura 37: Disco diamantado utilizado no corte de rochas ornamentais.	62
Figura 38: Corte de ladrilhos com dimensão de 30X15 cm de resíduos de chapas de granito Cinza Corumbá por serra diamantada.....	65
Figura 39: Lama de corte de ladrilhos de resíduos de chapas de granito Cinza Corumbá coletada na indústria Marmoraria Ico, situada em Salto – SP.	65
Figura 40: Esquema do procedimento de quarteamento de amostras.....	66
Figura 41: Aparas de corte ladrilhos de resíduos de chapas de granito Cinza Corumbá.....	66
Figura 42: Britador de mandíbulas utilizados na britagem de aparas de ladrilhos de resíduos de chapas de granito Cinza Corumbá.	67
Figura 43: Suporte de nylon utilizado para as pastilhas de pó corte e britagem nos ensaios de ângulo de contato.....	71
Figura 44: Adição de gota de água destilada e deionizada à pastilha do pó de rochas ornamentais para estimativa do ângulo de contato nos ensaios de molhabilidade. ...	72
Figura 45: Distribuição granulométrica do pó de corte do granito Cinza Corumbá (abertura das peneiras x porcentagem em massa retida em cada peneira).	73
Figura 46: Distribuição granulométrica do pó de britagem do granito Cinza Corumbá (abertura das peneiras x porcentagem em massa retida em cada peneira).	74

Figura 47: Frações separadas por peneiramento do pó de corte do granito Cinza Corumbá.....	76
Figura 48: Frações separadas por peneiramento do pó de britagem do granito Cinza Corumbá.....	76
Figura 49: Difrátogramas de raios-X dos pós de corte (ALC) e britagem (ABC) do granito Cinza Corumbá, os números 250 e 325 indicam a malha em mesh da peneira na qual o pó foi retido.	79
Figura 50: Difrátogramas de raios-X do pó de corte retido na peneira de 325 mesh utilizados na análise quantitativa pelo método Rietveld.	82
Figura 51: Difrátogramas de raios-X das frações magnéticas dos pós de corte (ALC) e britagem (ABC) retidos a 325 mesh.	84
Figura 52: Análise dos elementos de sódio a urânio por fluorescência de raios-X em amostras de pós de corte e britagem do granito Cinza Corumbá.	85
Figura 53: Micrografia do pó de corte do granito Cinza Corumbá passante em peneira 100 mesh obtida em modo de elétrons secundários (SEI).	86
Figura 54: Micrografia do pó de corte do granito Cinza Corumbá passante em peneira 100 mesh obtida em modo de elétrons retroespalhados (BEI).....	86
Figura 55: Espectro de dispersão de energia obtido por microsonda de raios-X da região do pó de corte do granito Cinza Corumbá amostrado nas figuras 53 e 54.....	87
Figura 56: Mapas de raios X da região analisada nas figuras 53 e 54.....	87
Figura 57: Micrografia de partícula de feldspato do pó de britagem obtida em modo de elétrons secundários (SEI).	88
Figura 58: Micrografia de partícula de feldspato do pó de corte obtida em modo de elétrons secundários (SEI)	88
Figura 59: Micrografia da fração magnética do pó de corte do granito Cinza Corumbá obtida em modo de elétrons retroespalhados (BEI).	89
Figura 60: Espectros infravermelhos de refletância difusa com transformada de Fourier (DRIFTS) dos pós de corte e britagem do granito Cinza Corumbá.....	90
Figura 61: Espectros infravermelhos de refletância difusa com transformada de Fourier (DRIFTS) do pó de britagem de granito Cinza Corumbá com e sem processo de extração do óleo lubrificante.....	90
Figura 62: Fotografia de topo de um béquer contendo água e pó de brita aglomerado em forma de esfera na superfície do líquido.	93

Figura 63: Fotografia de topo de um béquer contendo água e pó de corte no fundo do recipiente com o líquido.....	93
Figura 64: Representação do ângulo de contato na interface sólido/líquido/ar, de uma gota que: a) molha o sólido e b) não molha o sólido.	94
Figura 65: Esquema de tensões presentes no contato de uma gota de um líquido em equilíbrio na interface sólido/líquido/gás.	94
Figura 66: Gota de água espalhada na superfície de pastilha do pó de corte do granito Cinza Corumbá.	95
Figura 67: Gota de água na superfície de pastilha do pó de britagem do granito Cinza Corumbá.	96
Figura 68: Perfil da gota de água na superfície de pastilha do pó de britagem do granito Cinza Corumbá.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química de resíduos produzidos no corte de blocos de vários tipos de rochas ornamentais (modificado de CAMPOS et al., 2014).....	39
Tabela 2: Polimorfos de SiO ₂	45
Tabela 3: Fatores e níveis do plano fatorial 2 ² para adsorção de azul de metileno. .	70
Tabela 4: Porcentagem retida acumulada do pó de corte do granito Cinza Corumbá.	74
Tabela 5: Porcentagem retida acumulada do pó de britagem do granito Cinza Corumbá.....	75
Tabela 6: Densidade das amostras do pó de corte de britagem retidas a 325 mesh.	77
Tabela 7: Densidade dos principais minerais presentes em rochas graníticas.	77
Tabela 8: Área superficial do pó de corte e britagem do granito Cinza Corumbá retido a 325 mesh.....	78
Tabela 9: Compostos Identificados nos difratogramas de raios-X dos pós de corte e britagem mostrados na figura 49.....	80
Tabela 10: Possíveis minerais presentes na constituição mineralógica no granito Cinza Corumbá.	80
Tabela 11: Proporções entre as fases minerais, obtidas pelo método Rietveld, nas frações retidas a 250 e 325 mesh dos pós de corte (ALC) e britagem (ABC).	83
Tabela 12: Condições e respostas para o planejamento fatorial utilizado na adsorção de azul de metileno em pós de corte e de britagem do granito Cinza Corumbá.	91
Tabela 13: Resultados dos efeitos do planejamento fatorial 2 ² utilizado na adsorção de azul de metileno em pós de corte e de britagem do granito Cinza Corumbá.	92
Tabela 14: Eficiência da adsorção de azul de metileno em pós corte e de britagem do granito Cinza Corumbá.....	92

SUMÁRIO

1. Introdução	17
1.1. Rochas Ornamentais	17
1.1.1. Definição.....	17
1.1.2. Tipos de Rochas Ornamentais	20
1.1.3. Ocorrência e Industrialização	28
1.1.4. Panorama Industrial.....	34
1.1.5. Geração de Resíduos.....	36
1.1.6. Aproveitamento de Resíduos de Rochas Ornamentais	42
1.2. Principais Minerais Formadores dos Granitos	44
1.2.1. Quartzo.....	44
1.2.2. Feldspatos	49
1.2.3. Micas	52
1.3. Mecanoquímica	54
1.3.1. Definição.....	54
1.3.2. Exemplos de Estudos e Aplicações da Mecanoquímica.....	56
1.3.3. Cominuição.....	58
1.3.4. Corte de Chapas de Rochas	62
2. Objetivos	64
3. Materiais e métodos	65
3.1. Preparação das Amostras	65
3.2. Análise Granulométrica	67
3.3. Densidade	68
3.4. Área Superficial	68
3.5. Difração de Raios-X	68
3.6. Fluorescência de Raios-X	69
3.7. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	69
3.8. Espectroscopia no Infravermelho de Refletância Difusa com Transformada de Fourier (DRIFTS).....	69
3.9. Adsorção de Azul de Metileno	70
3.10. Molhabilidade dos Pós de Resíduos de Rochas Ornamentais	71
4. Resultados e Discussão	73

4.1. Análise Granulométrica	73
4.2. Densidade	77
4.3. Determinação de Área Superficial	78
4.4. Difração de Raios-X.	78
4.5. Fluorescência de Raios-X	84
4.6. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	85
4.7. Espectroscopia no Infravermelho de Refletância Difusa com Transformada de Fourier (DRIFTS).....	89
4.8. Adsorção de Azul de Metileno	91
4.9. Molhabilidade dos Pós de Resíduos de Rochas Ornamentais.....	92
4. Discussão Final.	97
5. Conclusões.....	99
6. Bibliografia.....	100

1. Introdução

1.1. Rochas Ornamentais

1.1.1. Definição

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define, na norma NBR 15012:2013, rocha ornamental como “material pétreo natural utilizado em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração, mobiliário e arte funerária”¹.

O termo rocha de revestimento, por sua vez segundo a ABNT, refere-se a uma rocha ornamental submetida a diferentes graus ou tipos de beneficiamento que é utilizada no revestimento de superfícies, especialmente pisos, paredes e fachadas¹.

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) utiliza o termo *dimension stone* para definir as rochas ornamentais como qualquer material rochoso natural serrado, cortado em chapas e fatiado em placas, com ou sem acabamento mecânico e que pode ser utilizado em revestimentos de prédios, pisos, bancadas, monumentos e outros produtos industrializados aplicados na ornamentação².

Essa definição exclui a brita utilizada em concreto e asfalto, além de produtos sintéticos que simulam pedras chamados rochas artificiais que são constituídos de rochas moídas e quebradas agregadas artificialmente com resinas².

Assim, baseando-se nas definições da ABNT e da ASTM o termo rochas ornamentais pode designar materiais pétreos extraídos e beneficiados, em maior ou menor grau, para serem utilizados com funções de revestimento (figura 1), decorativas (figura 2) ou estruturais (figura 3).



Figura 1: Aplicação de rochas ornamentais como revestimento de uma escada revestida em mármore branco clássico.



Figura 2: Aplicação de rochas ornamentais como peças decorativas em tabuleiro de xadrez em granito café, granito tabaco, calcário e pedra sabão.



Figura 3: Aplicação de rochas ornamentais como peças estruturais em muro, arco e escada de granito Vermelho Salto.

Segundo Vidal e colaboradores³, o termo rocha ornamental, abrange materiais como pedras naturais, materiais lapídeos, rochas dimensionadas e rochas de cantaria¹. Sua utilização tem acompanhado a evolução da humanidade e, graças a sua durabilidade, serve de registro da cultura, dos costumes e da tecnologia ao longo da história.

Apesar do uso de pedra ter diminuído relativamente a outros materiais de construção na última metade do século 20, houve um ressurgimento da sua utilização no final da década de 1990, resultado provavelmente do uso de novas técnicas de produção e do reconhecimento de sua beleza e durabilidade pelos consumidores.

¹ Material entalhado manualmente com ferramentas rudimentares ver figura 3.

Nesta última década³, com o objetivo de simular rochas ornamentais, inúmeros materiais sintéticos constituídos por rochas naturais aglutinadas com resinas de poliéster são comercializados como rochas sintéticas ou pedras industrializadas. Porém, profissionais da área de construção civil como arquitetos e engenheiros tem preferido o uso das rochas ornamentais em detrimento das rochas sintéticas devido ao material natural ser uma melhor opção em estética, durabilidade e facilidade de manutenção.

Vargas e colaboradores, fornecem outra definição do termo rochas ornamentais como rochas submetidas ao polimento ou outro tratamento de superfície e utilizadas para fins decorativos, em revestimento de pisos, paredes e na confecção de pias, lavabos, mesas e assemelhados⁴. As figuras 1 e 2 mostram exemplos dessas aplicações.

Nesta última definição não estão incluídos materiais pétreos utilizados na construção civil onde a principal importância relaciona-se à propriedade estrutural como no muro de arrimo da figura 3. Neste conceito ainda, as rochas não polidas utilizadas com finalidades decorativas são definidas como "rochas semi ornamentais" como a pedra miracema da figura 4 utilizada no revestimento de calçadas.



Figura 4: Ladrilhos de pedra miracema com dimensões de 23,0X11,5X1,5cm utilizado em revestimento de calçadas.

Por serem utilizadas como ornamento ou revestimento, as rochas ornamentais são escolhidas principalmente em função de suas características estéticas. Outros fatores importantes são as características técnicas e a disponibilidade comercial.

O fato de a estética ser determinante na escolha do material pode criar problemas pela especificação ou aplicação inadequadas, já que os profissionais que indicam o uso das rochas, normalmente arquitetos e comerciantes, tem pouco conhecimento das características técnicas das rochas ornamentais⁵.

O aspecto estético de uma rocha ornamental é resultado da interação de três fatores que dependem das características petrográficas do material:

a) Coloração - depende da composição química dos minerais constituintes e de seu estado de alteração. Em geral, esse é o aspecto estético mais importante, a ponto de decidir a possibilidade comercial de uma rocha em detrimento de outros parâmetros.

b) Textura - é caracterizada pela distribuição espacial dos minerais que constituem a rocha. A textura é homogênea quando não há distribuição preferencial dos minerais e a rocha é visualmente isotrópica. Na textura vejada há a presença de veios que cortam a massa rochosa seguindo uma orientação bem definida. Na textura orientada os componentes da rocha têm uma direção preferencial definida diferenciando-se da vejada porque todos os minerais componentes da rocha são visíveis a olho nu.

c) Granulação - refere-se aos tamanhos dos grãos minerais ou à forma dos cristais ou outros elementos pétreos que constituem a rocha. As rochas são classificadas como de granulometria fina, média ou grossa.

Há muitas publicações em revistas especializadas ou sites da internet que anunciam produtos de pedra natural por meio de catálogos. Algumas empresas incluem propriedades físicas, químicas e mecânicas das rochas determinadas por vários métodos de ensaio normalizados. No entanto, no Brasil existe escassez de recursos e materiais didáticos para orientar os profissionais que trabalham no setor³.

1.1.2. Tipos de Rochas Ornamentais

A nomenclatura das rochas é mais complexa do que as definições comumente utilizadas que facilitam o comércio e a aplicação dos materiais. Porém, o nome usual do material pode criar confusões com a terminologia científica. A classificação das rochas apesar de consagrada por consumidores e produtores do setor é muitas vezes errônea do ponto de vista mineralógico^{6,7}.

Muitas rochas ígneas, metamórficas e sedimentares são usadas como rochas ornamentais. Comercialmente, estes materiais são classificados em granitos e

mármoreos que são responsáveis por 90% da demanda nacional. Além desses, há outras rochas de menor consumo, como ardósias, quartzitos, serpentinitos e esteatitos (pedra sabão)⁸.

1.1.2.1. Granitos

Os granitos^{8,9} são rochas magmáticas com textura granular compostas principalmente de quartzo e feldspato, com quantidades pequenas de micas como a biotita e a muscovita, podendo ter normalmente como minerais acessórios zircão, apatita, magnetita, piroxênio e anfibólio. Os granitos têm um alto teor de SiO_2 , em torno de 75%, na forma de quartzo e nos feldspatos.

Comercialmente são considerados granitos todos os tipos de rochas não calcárias (à exceção de alguns quartzitos e ardósias) que podem ser cortados, polidos e são passíveis de uso como material de revestimento. Além de apresentarem granulação variada, os granitos comerciais podem envolver diversos tipos de rochas discriminadas com base mineralógica em:

- a) *Granitos quartzo-feldspáticos*, representados pelos chamados granitos verdadeiros e também por inúmeros gnaisses, por rochas vulcânicas ácidas até intermediárias e até por conglomerados;
- b) *Granitos feldspáticos*, que correspondem aos sienitos;
- c) *Granitos máficos*, que de fato correspondem a rochas básicas, tais como gabros de grão fino e basaltos;
- d) *Granitos ultramáficos*, que correspondem a rochas ultramáficas ricas em serpentina, anfibólios e clorita.

A coloração dessas rochas pode ser explicada com base no conteúdo mineralógico primário e secundário das rochas. Os granitos cinza esbranquiçados, que constituem os tipos mais comuns, têm essa coloração em parte devido à presença de minerais primários tais como feldspatos (responsáveis pela coloração branca e cinza), quartzo (responsável pela coloração cinza e pelas regiões incolores) e a biotita (responsável pela coloração preta). Um exemplo desse tipo de granito pode ser visto na pia de cozinha mostrada na figura 5.

Tipos esbranquiçados são raros e denotam ausência de minerais máficos, enquanto tons róseos e encarnados decorrem da presença de certos feldspatos, de granadas como as almandinas, de inclusões ricas em ferro ou de suas alterações.

Os tons de marrom decorrem da presença de inúmeras inclusões de agulhas de rutilo e lamelas de ilmenita em feldspatos e minerais máficos.



Figura 5: Pia de cozinha produzida em granito Cinza Corumbá.

Os materiais verdes estão selecionados à presença de minerais máficos como anfibólios e piroxênios, ou a cloritas. A coloração preta é realçada pela granulação fina das rochas ricas em constituintes máficos. Tons amarelados e alaranjados decorrem da alteração de minerais máficos, como a biotita e de minerais opacos.

Os granitos possuem resistência mecânica maior que os mármore, além disso, são mais duros (5 a 6 na escala de Mohs) e mais resistentes a ataques ácidos. Essas características juntamente com a estética fazem do granito um material de alta qualidade tradicionalmente utilizado na construção civil, onde compete com uma variedade de alternativas para diferentes aplicações especialmente em revestimentos internos e externos, na pavimentação, na alvenaria e na decoração.

A utilização dessas rochas ornamentais como material de revestimento depende de suas propriedades físicas, mecânicas, químicas e de seu aspecto decorativo. Esse último item, como mencionado anteriormente, é muito importante para a maioria das rochas ornamentais que têm a cor como o componente principal da sua designação comercial. Por exemplo: granito Verde Ubatuba, Azul Bahia, Rosa Salto, Vermelho Capão Bonito, Preto Tijuca, Branco Ceará.

1.1.2.2. Mármore

Mineralogicamente⁸, o mármore é uma rocha calcária metamórfica predominantemente constituída de grãos de calcita ou dolomita. Os mármore são divididos em dois grandes grupos: os calcíticos quando constituídos basicamente

por carbonato de cálcio (CaCO_3) e os dolomíticos, quando o constituinte predominante for o carbonato duplo de cálcio e magnésio ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$).

Em função do grau metamórfico, essas rochas apresentam granulação variada. Os grãos individuais dos principais minerais constituintes destas rochas apresentam clivagem perfeita característica da calcita e da dolomita. Em relação ao tamanho, os grãos podem ser pequenos e não identificados visualmente, ou grossos quando podem ser vistos a olho nu.

A baixa dureza dos mármore (3,5 a 4,5 na escala de Mohs) e a textura sacaróide faz com que essas rochas tenham uma baixa resistência à abrasão. Além disso, esses materiais são atacados por ácidos, liberando gás carbônico e água. Quando puras essas rochas são brancas, porém impurezas como argilas, micas, quartzo, pirita, óxidos de ferro e grafite podem criar uma ampla variedade de cores.

Do ponto de vista comercial⁵, são considerados mármore todos os tipos de rocha calcária de origem sedimentar ou metamórfica, que podem ser cortados e polidos com facilidade. Assim, os calcários e travertinos passíveis de polimento são rochas que se englobam nessa definição.

A nomenclatura comercial desses materiais está relacionada comumente com a localização da pedreira, a cor e também a um adjetivo que descreve o padrão ou textura da pedra. Quando o padrão se refere aos veios, o mesmo material pode receber nomes alternativos, pois, as chapas de mármore geradas pelo corte de blocos em planos diferentes produzem materiais com aspectos diferenciados esteticamente.

Com qualificação ornamental ou de revestimento, destacam-se alguns materiais conhecidos mundialmente como o mármore Carrara que é um tipo de calcário de grão muito fino e com larga aplicação em estatuário. No mercado brasileiro dentre outros tipos de mármore comerciais disponíveis no mercado, podem ser destacados o Bege Bahia (travertino) e os diversos tipos de mármore brancos provenientes do estado de Espírito Santo.

Devido a sua baixa resistência à abrasão e ao intemperismo, principalmente em ambientes ácidos, os mármore polidos devem ser aplicados em ambientes internos como lavatórios de banheiro (figura 6) e outras peças de ornamentação. O material rústico, devido à sua rugosidade e capacidade térmica também pode ser aplicado em revestimentos externos como bordas de piscina.



Figura 6: Lavatório de banheiro produzido em mármore Branco Espírito Santo.

1.1.2.3. Ardósias

As ardósias⁸ são rochas de baixo de grau metamórfico derivadas de rochas sedimentares como o xisto. A distinção deste tipo de rochas das demais com planos preferenciais de clivagem pode ser determinada pela sua granulação muito fina e pela grande capacidade de partição em superfícies paralelas.

Essas rochas são formadas predominantemente por filossilicatos, principalmente a mica sericita¹¹ ($\text{KAl}_2(\text{OH})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$). A presença desse mineral confere à rocha proeminente laminação, permitindo fácil obtenção de placas mais ou menos uniformes. Seus acessórios mais comuns incluem quartzo, clorita, ilita, carbonatos, feldspatos e minerais opacos como a galena, a pirita e a calcopirita.

Sendo essencialmente constituídas por minerais estáveis as ardósias são resistentes ao intemperismo e por isso são altamente duráveis. Impurezas como carbonatos de cálcio ou magnésio, contribuem para a diminuição da durabilidade, diminuindo a resistência do material a ambientes ácidos. Essas rochas são geralmente impermeáveis e pouco resistentes ao desgaste abrasivo.

As ardósias comercializadas no Brasil provenientes do estado de Minas Gerais (que é responsável por 95% produção brasileira¹⁰) não constituem ardósias verdadeiras, representando um estágio anterior de metamorfismo, o que, entretanto, não interfere com suas qualidades e uso como as ardósias propriamente ditas.



Figura 7: Bancos e mesa produzidos em ardósia cinza.

Fonte: <http://www.casadaardosia.com.br/Content/Uploads/Produtos/43.jpg>

No mercado são vendidas como chapas polidas e lajotas e designadas com base na sua cor (vinho, verde e cinza). As variedades de cor cinza, preta e grafite podem dar origem à ardósia ferrugem que é o resultado da oxidação de finas lamelas de pirita. Essas rochas ornamentais são aplicadas na fabricação de inúmeros materiais (figura 7) como tampos, banco, mesas de bilhar e pisos.

1.1.2.4. Quartzitos

Quartzitos^{8,11} podem ser definidos como rochas metamórficas com textura sacaróide, derivadas de sedimentos arenosos, formadas de 70 a 95% por grãos de quartzo (SiO_2) recristalizados e envolvidos ou não por cimento silicoso. A recristalização mineralógica ocorre por efeito de pressão e temperatura atuantes sobre os sedimentos originais.

Os quartzitos ornamentais diferenciam-se por conta do grau de recristalização e pelo conteúdo de outros minerais, além do quartzo, como micas, magnetita, granada, pirolusita, feldspatos, dumortierita e cianita. É da presença ou ausência de alguns destes minerais, notadamente dumortierita e cianita que resulta a variação da cor determinante na sua qualificação comercial.

Quando apresentam alto grau de recristalização, a granulação é predominantemente fina e, se são constituídos essencialmente por quartzo, mostram textura granoblástica (quando a rocha apresenta minerais granulares sem orientação). Nesses casos, a rocha é muito resistente mecanicamente o que possibilita a obtenção de chapas regulares e, posterior processo de polimento e lustro.

Por outro lado, os quartzitos com alto conteúdo em minerais micáceos podem apresentar foliação até muito bem desenvolvida em função da disposição preferencial destes filossilicatos, o que não permite a extração de blocos. Nesses casos, as chapas são produzidas diretamente e manualmente do afloramento, pois podem ser partidas com facilidade, segundo os planos definidos pela concentração das micas e o material é utilizado como revestimento rústico de superfícies,.

Os quartzitos foliados apresentam algumas características particulares como superfícies planas e antiderrapantes. Essas propriedades o tornam interessante para serem empregados como revestimento externo e interno de edificações. Como exemplo, na figura 8, pode ser observada a aplicação do quartzito São Tomé no revestimento da borda e do piso externo de área de uma piscina.

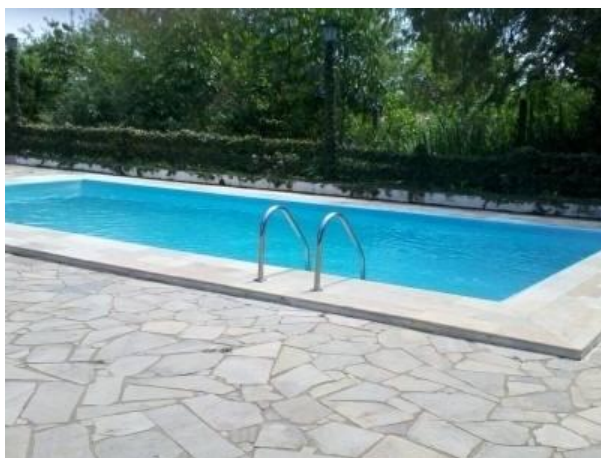


Figura 8: Revestimento de borda e piso externo de uma piscina com quartzito São Tomé.

Fonte: http://mlb-s1-p.mlstatic.com/pedra-so-tome-caco-branco-retalho-menor-preco-de-sp-694901-MLB20432751451_092015-O.jpg

As principais áreas produtoras dos quartzitos foliados brasileiros situam-se nos municípios de São Tomé das Letras e Luminárias em Minas Gerais e na região de Campos no Rio de Janeiro. Já os quartzitos maciços com maior extração e beneficiamento localizam-se na Bahia. Parte da produção brasileira já alcança os mercados europeu e americano, porém, verifica-se uma produção irregular voltada para atender em grande parte às demandas do mercado interno.

1.1.2.5. Serpentinitos e Esteatitos (Pedra Sabão)

Os serpentinitos são rochas metamórficas de derivação magmática compostas basicamente por minerais do grupo da serpentina¹¹ ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). Essas rochas possuem coloração verde-escura a amarelada, são maciças a fibrosas e de baixa dureza. Esses materiais podem receber polimento e são utilizados para revestimentos (figura 9).



Figura 9: Piso revestido com serpentinito verde.

Fonte: <http://i1.wp.com/www.colegiodearquitetos.com.br/dicionario/wp-content/uploads/2009/02/serpentino.jpg?w=800>

Com frequência, de forma incorreta, essas rochas são comercializadas sob a designação de mármore verde como o Verde Rajasthan (Índia) e o Verde Alpi (Itália)¹². Esses materiais são muitas vezes confundidos com a pedra sabão (esteatitos) pela sua coloração esverdeada³.

Em temperaturas elevadas e na presença de sílica, estes serpentinitos foram transformados em esteatitos (pedra sabão), a partir da reação da serpentina com a sílica, que resulta na formação do talco¹¹ ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}$) e na liberação de água. Os esteatitos são rochas untuosas ao tato e de baixíssima dureza.

A pedra sabão é empregada usualmente na produção de objetos residenciais e decorativos, e no setor estatuario³ (figura 10). No Brasil, as principais áreas de ocorrência, extração e produção estão no estado de Minas Gerais. Grande parte dos esteatitos extraídos destina-se ao mercado interno e uma pequena parcela da produção destina-se a confecção de lareiras, que são exportadas para os mercados europeu e americano.



Figura 10: Pilões de esteatito (pedra sabão).

Fonte: http://www.tachodecobre.com.br/wp-content/uploads/2011/03/Pil%C3%A3o_de_Pedra_Sab%C3%A3o.jpg

No passado, essas rochas foram amplamente utilizadas nas construções residenciais e nas edificações de importantes monumentos. São inúmeras as igrejas de Minas Gerais com pisos de serpentinito e detalhamento em esteatito (pedra sabão) como as esculturas de Aleijadinho.

1.1.3. Ocorrência e Industrialização

As rochas ornamentais podem ser encontradas na natureza na forma de maciços rochosos, como exemplificado pela jazida de mármore Carrara na figura 11, ou na forma de matacões, que são blocos métricos ou decamétricos em forma ovalada, como exemplificado pela jazida de granito Vermelho Salto, figura 12.

Os granitos ocorrem em maciços ou matacões, porém, os mármore só ocorrem na forma de maciços. O beneficiamento desses materiais, que são as principais rochas ornamentais, visa basicamente a transformação dos blocos, extraídos na fase de lavra, em chapas com 2 ou 3 cm de espessura e a transformação em produtos finais. Esses processos dão origem aos vários ramos desse setor industrial: lavra, desdobramento, acabamento de superfície e beneficiamento final³.



Figura 11: Ocorrência e extração de mármore Carrara em maciço rochoso.

Fonte: <https://www.focuspedra.com/nace-cluster-tecnologico-del-marmol-la-piedra-ornamental-carrara/>



Figura 12: Ocorrência de rochas ornamentais na forma de matacões em jazida de granito Vermelho Salto.

1.1.3.1. Lavra

A lavra das rochas ornamentais tem o objetivo de remover o material economicamente aproveitável dos maciços rochosos ou dos matacões. O produto da etapa de lavra é o bloco (figura 13) de arestas aproximadamente retangulares, de dimensões variadas comumente em: 2,8 a 3,0 m de comprimento, 1,7 a 1,9 m de altura e 1,6 a 1,8 m de espessura que procuram proporcionar o melhor aproveitamento do material e a maior utilização da capacidade produtiva dos equipamentos nas etapas seguintes de beneficiamento.

A lavra de matacões consiste em extrair os blocos por meio de furos raiados coplanares e paralelos, usando-se cunhas e marretas para secionar o corpo. Esse método não apresenta garantias necessárias a grandes projetos devido às dúvidas

relativas à homogeneidade da rocha e total do volume da jazida. Este método de extração é menos oneroso por apresentar custos baixos para abertura de acessos, mão de obra pouco qualificada e custos operacionais reduzidos, mas gera uma grande quantidade de resíduo o que pode gerar grandes problemas ambientais.



Figura 13: Extração de bloco de mármore em maciço rochoso.

Fonte: http://www.es-acao.org.br/_midias/jpg/rochas_ornamentais-909-4e0caf2908b1e.jpg

A extração de rochas diretamente do maciço (figura 13) permite um maior planejamento de lavra devido aos grandes volumes envolvidos. Os principais tipos de extração são por bancadas e painéis verticais. A primeira maneira consiste em dividir a jazida em planos horizontais subparalelos que permitem a exploração por diferentes frentes. Podem ser realizados procedimentos por bancadas altas para maciços heterogêneos e por bancadas baixas, para maciços homogêneos.

Já o segundo método extração, denominado por painéis verticais, é aplicado nas fases iniciais da pedreira e no caso em que é permitido o desenvolvimento em profundidade devido à limitação das reservas ou a condicionantes físicos da jazida.

A lavra em maciços rochosos possibilita maiores vantagens de operação em relação à lavra de matacões, pois proporciona uma extração racional com reflexo positivo na relação custo/benefício, havendo uma tendência mundial no sentido de se usar esse método da lavra de matacões¹³.

1.1.3.2. Desdobramento

Esta fase do beneficiamento compreende a preparação e serragem dos blocos em chapas de espessura, usualmente com dois ou três centímetros de espessura, 2,8 a 3,0 m de comprimento e 1,7 a 1,9 m de altura. Esse procedimento,

no Brasil, é realizado essencialmente por teares multilâmina (figura 14) apesar do crescimento acentuado nos últimos anos da utilização dos teares multifio (figura 15)¹⁴.

No desdobramento por tear de lâminas o corte ocorre na direção de maior comprimento do bloco. A serragem ocorre pelo atrito entre lâminas de aço e uma lama abrasiva (preparada com água, cal e granalha de aço) com o bloco de rocha. Já a serragem por fio diamantado ocorre pela ação abrasiva de anéis ou pérolas com grãos de diamante dispostos ao longo de um fio de aço que funciona como uma espécie de serra fita tensionada sobre o bloco e realiza o giro.



Figura 14: Serragem de bloco de rochas ornamentais por tear multilâmina.

Fonte:

<https://encryptedbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRmLJiiI2YEP0AzQCfYpvt76vI69DF4IY8HM6SgLwqIWFQrALsf>

O tear multifio tem melhor desempenho em comparação ao multilâmina, pois tem melhor produtividade (seis vezes maior), desempenho ambiental e qualidade do corte. Por outro lado, o tear convencional (multilâminas) é menos oneroso tanto na compra do equipamento como nos insumos (metade do custo do tear multifio), além de ter maior facilidade de assistência técnica. Assim, esses fatores justificam o fato do corte multilaminas ser o mais difundido independentemente do tipo de material a ser serrado.

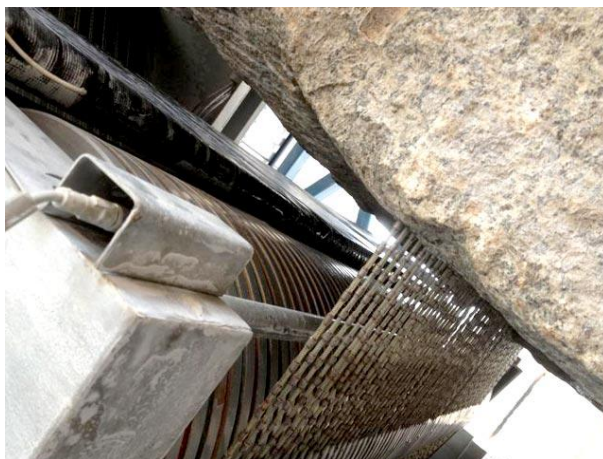


Figura 15: Serragem de bloco de rochas ornamentais por tear multifio.

Fonte: http://rosh.ind.br/produtos_tear.php#

1.1.3.3. Acabamento Superficial

Nessa fase, as chapas são submetidas a um acabamento superficial, com ou sem resinagem dependendo da porosidade do material, que pode ser polimento quando se necessita ressaltar a coloração, textura e aparência do material ou um simples desbaste, escovamento, apicoamento ou flameamento quando se deseja obter uma aparência mais rústica ou em alguns uma superfície antiderrapante.

O polimento é o acabamento (figura 16) mais comum para as chapas de rochas ornamentais e nesse processo o material passa por uma retirada inicial das ondulações da placa por meio do atrito de rebolos abrasivos (normalmente produzidos a base de carbetto de silício ou diamantados), refrigerados a água, aplicados através de uma máquina politriz. A granulometria dos rebolos diminui progressivamente até chegar a um processo de brilho final.



Figura 16: Processo de polimento de chapas de granitos com politriz automática.

Fonte: http://www.cimef.com.br/pt/prod_polimentos_beka_2005.php

Algumas rochas, por motivos estéticos e/ou tecnológicos, são submetidas aos processos de resinagem e telagem. A resinagem visa aumentar a resistência da rocha a agressões por intempéries e melhorar o aspecto visual enquanto que a telagem é aplicada em rochas muito fraturadas e com baixa resistência a esforços mecânicos de flexão.

1.1.3.4. Beneficiamento Final

Depois da chapa de rocha ornamental passar por um dos tipos de acabamento de superfície o material pode seguir dois caminhos o corte em ladrilhos em grande escala ou a utilização em serviços de marmoraria. Neste segundo modo de transformação as rochas ornamentais atendem à demanda de produtos específicos, para unidades residenciais individuais ou trabalhos que requeiram acabamentos mais elaborados.

Assim, os serviços de marmoraria apresentam um alto grau de diversificação: as chapas de rochas são recortadas através de discos diamantados, recebem diversos acabamentos de borda utilizando-se lixadeiras manuais (figura 17) ou polibordas munidas de abrasivos diamantados ou a base de carbeto de silício. Os processos de corte e acabamento devem ser dotados de sistema de umidificação capaz de minimizar a geração de poeira decorrente de seu funcionamento.



Figura 17: Acabamento de borda via úmido com lixadeira manual pneumática.

A maior parte da produção das marmorarias é voltada para o mercado interno, produzindo peças sob medida, como: ladrilhos para revestimento de residências, escadas, peitoris para janelas, soleiras, bancadas para cozinha ou banheiro e lápides, dentre outros produtos.

1.1.4. Panorama Industrial

A produção mundial de rochas ornamentais passou de 1,5 milhão de t/ano, na década de 20 do século passado, para 130 milhões de toneladas em 2013, correspondentes a cerca de 48 milhões de metros cúbicos ou 1,42 bilhões de metros quadrados equivalentes às chapas com dois centímetros de espessura.

Estima-se que no ano de 2020 a produção mundial de rochas ornamentais ultrapasse 170 milhões de toneladas, correspondentes a quase dois bilhões de metros quadrados equivalentes por ano, devendo-se ainda ter um incremento de 30% no volume físico das atuais transações internacionais.¹⁵

O Brasil, em 2015, foi o quinto maior produtor de rochas ornamentais do mundo e o terceiro maior produtor exportador de granitos ficando atrás da China e da Índia. O maior volume de exportação brasileira é remetido aos Estados Unidos, seguido de China e Itália.

Apesar do volume físico de rochas exportadas em 2015 de material bruto, como blocos de granitos e mármore (920 mil toneladas), ser próximo ao de rochas processadas, como chapas polidas e peças acabadas (1180 mil toneladas), na figura 18 pode ser observado que o material processado tem um valor agregado muito maior¹⁶.

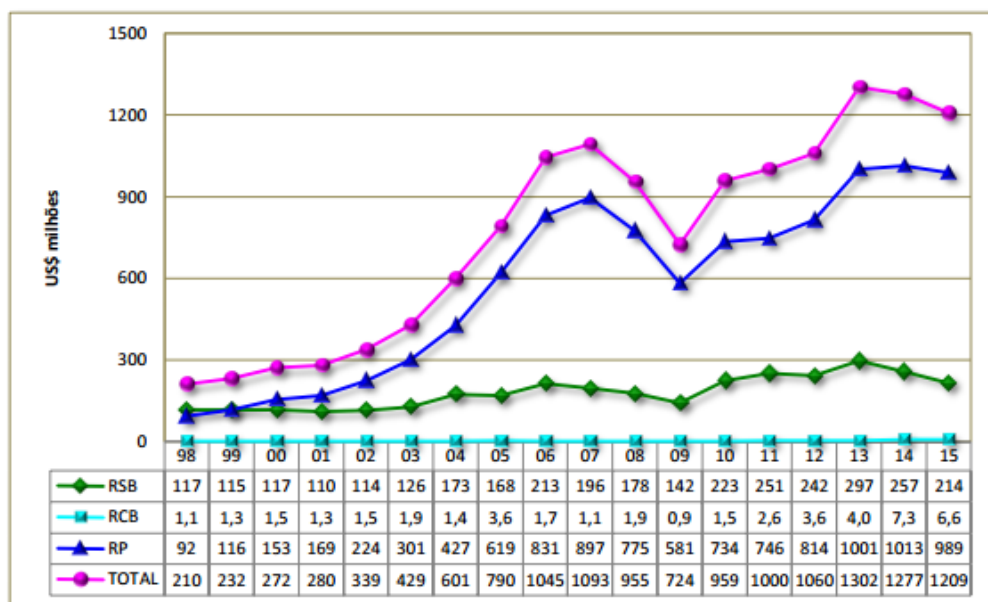


Figura 18: Quadro representativo da evolução das exportações brasileiras de rochas ornamentais 1998 a 2015.

(RSB-blocos de granito; RCB-blocos de mármore; RP-rochas processadas).

Fonte: http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/3609/Informe_01_2016.pdf

Da análise da evolução das exportações brasileiras de rochas ornamentais mostrada na figura 18 observa-se um aumento significativo entre os anos de 2004 e 2007 uma forte queda em 2009 com uma retomada das exportações a partir de 2010. Contudo, nos últimos três anos uma nova tendência de queda é observada.

Apesar de ter apresentado uma significativa melhora na qualidade operacional do parque industrial nacional, principalmente em relação às técnicas de serragem de blocos e polimento de chapas, necessita-se de atividades de pesquisa nesse importante setor produtivo. Em todo o processo de beneficiamento de rocha ornamental existem lacunas no conhecimento que, em última análise, geram custos, contribuindo para uma diminuição da competitividade brasileira no mercado internacional.

A dimensão do setor brasileiro de rochas ornamentais é mostrada pelos seguintes dados de 2015:

- Produção estimada de 9,5 milhões de toneladas de rochas ornamentais (aproximadamente 7% da produção mundial).
- 1.200 variedades comercializadas nos mercados interno e externo.
- 500 pedreiras ativas.
- 10 mil empresas atuando na cadeia produtiva.
- 120 mil empregos diretos no setor.
- Capacidade de produção de 50 milhões de m² por ano de rochas de processamento simples.
- Consumo interno de 70,3 milhões de m², incluindo rochas de processamento simples e especial.
- US 1,21 bilhão (aproximadamente 6% do total mundial) e 2,32 milhões de toneladas (aproximadamente 5% do total mundial) exportados.
- Saldo de USD 1,17 bilhão na balança comercial do setor de rochas.
- Exportações de 22,6 milhões de m² equivalentes de granitos e similares em chapas (com 2 cm de espessura).
- Pelo menos 400 empresas exportadoras (vendas no exterior para mais de 100 países).
- Quinto maior produto de base mineral exportado pelo Brasil, atrás dos minérios de ferro, de cobre, ouro e ferro-nióbio.
- Transações comerciais superiores a US\$ 5 bilhões nos mercados interno e externo, envolvendo máquinas e produtos do setor.

- Principal fornecedor para o mercado dos EUA (US 792,2 milhões exportados).
- Maior e melhor produtor mundial de chapas (capacidade de 93 milhões m²/ano).
- 320 teares multifio diamantados em operação (sendo 100 teares de fabricação nacional).

A participação dos granitos e similares correspondeu em 2015 à cerca de 50% da produção nacional, enquanto as ardósias e quartzitos estão em declínio, devido à queda nas exportações. A região Sudeste foi responsável por 64,5% da produção.

As zonas produtoras mais importantes estão localizadas nos estados de PE, BA, PB, MG, ES, RJ e SP. O estado do Espírito Santo é o principal produtor nacional, sendo responsável por cerca de 50% da produção nacional. Já São Paulo e Rio de Janeiro são os principais polos de consumo de rochas ornamentais.

1.1.5. Geração de Resíduos

Os resíduos de rochas ornamentais podem causar impactos sobre o meio ambiente (água, ar e solo) e diretamente ao ser humano como a silicose. Além disso, representam um desperdício de recurso natural, já que podem ser utilizados para outros fins, como agregados ou matérias primas para novos produtos, motivo pelo qual são, muitas vezes, denominados de estoques remanescentes¹⁷.

As etapas de beneficiamento das rochas geram diversos tipos de resíduos, constituídos de pós ou pedaços de pedras com várias dimensões, desde centímetros até metros, além de restos de insumos industriais, tais como os abrasivos e polidores¹⁸, utilizados no processamento das rochas.

A figura 19 mostra uma estimativa das quantidades de resíduos gerados nos diversos ramos da indústria de rochas ornamentais levando-se em conta a exportação e o consumo interno do material. Os resíduos gerados desde a lavra até o beneficiamento final de rochas ornamentais representam perdas de matéria-prima que são da ordem de 83%¹⁹.

Para produzir 330 m² de chapas (média obtida de um bloco de 10 m³), são extraídos, em média, 30 m³ de rocha do maciço. Desses, 20m³ ficam na pedreira na forma de resíduos. Na transformação do bloco (volume médio 10 m³) em chapas, na serraria e no polimento perdem-se ainda cerca de 4m³ em média, e apenas 6m³ são

efetivamente transformados em chapas. Considerando-se uma perda de 15% no beneficiamento final em cima das chapas pode ser gerado aproximadamente mais 1m^3 de resíduo. Assim, dos 30m^3 iniciais somente 5m^3 são realmente utilizados totalizando uma estimativa de perda da ordem de 83%.

Algumas dessas perdas são inevitáveis, pois estão ligadas à natureza (qualidade) das rochas ou às próprias características da jazida e ao processo de corte. No entanto o desperdício pode e deve ser diminuído melhorando o conhecimento das jazidas, o planejamento da lavra, as técnicas de produção (corte, polimento e acabamento final) e, principalmente, a valorização dos resíduos gerados transformando-os em subprodutos.

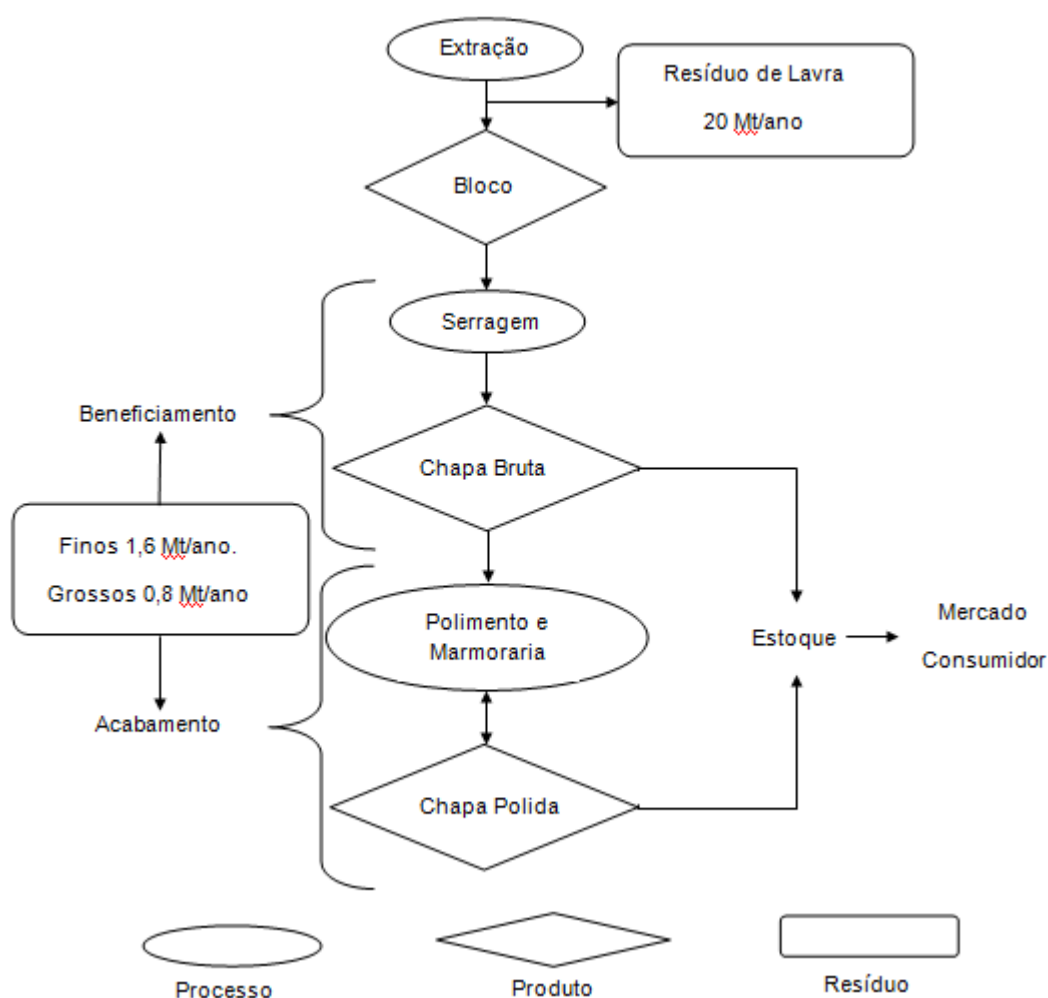


Figura 19: Estimativa do volume de resíduos gerados na indústria de rochas ornamentais (modificado de CAMPOS et al., 2014).

1.1.5.1. Resíduo de Lavra de Blocos

Os resíduos gerados na extração das rochas diretamente dos maciços ou matacões são grossos, normalmente blocos fora de padrão, irregulares e com defeitos, pedaços de blocos, lascas de rochas e cascas (parte externa da rocha). Como mencionado anteriormente cerca de dois terços do material extraído nessa etapa é descartado e normalmente deixado no solo das pedreiras (figura 20).



Figura 20: Resíduos de rochas ornamentais da fase de lavra.

Fonte: http://www.pemagran.com.br/wp-content/uploads/2012/08/tn_Pedreira-Iberez-Crema-Bordeaux-2.jpg

1.1.5.2. Resíduo de Serragem e Polimento

A serragem de blocos e o acabamento de superfície são normalmente etapas feitas em sequência e na mesma empresa. Nessas duas fases de beneficiamento são gerados resíduos que variam muito em termos de granulometria: grossos ($>2\text{mm}$) dos casqueiros (parte externa dos blocos) e aparas, finos ($2-0,075\text{ mm}$) e ultrafinos ($<0,075\text{ mm}$) do corte e polimento das chapas. Esses resíduos, ainda, são de composição mineralógica diversa, dependendo dos tipos de rochas beneficiadas como mostra a Tabela 1.

Segundo Souza, Vidal e Castro (2012)²⁰, o volume de resíduos grossos gerados após o desdobramento de blocos em placas, levando-se em consideração medições feitas em várias empresas e com diferentes equipamentos, foi de aproximadamente 14% e o de finos e ultrafinos correspondeu a 26% do volume inicial do bloco totalizando 40% de perda do material.

Tabela 1: Composição química de resíduos produzidos no corte de blocos de vários tipos de rochas ornamentais (modificado de CAMPOS et al., 2014).

Tipo de bloco rochoso	Composição (%)						
	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Granitos (corte com granalha)	5	2	62	12	7	4	3
Mármore	50	15	5	1	1	0,2	0,1
Mistura de granitos/mármore	21	4	36	9	5	4	2
Calcários	20	5	5	0,5	0,2	0,2	0,2
Quartzitos	0,6	-	80	9	1	-	-

Os resíduos finos e ultrafinos são gerados como efluentes em forma de lama, já que o processo de beneficiamento é realizado a úmido, motivo pelo qual as unidades de beneficiamento de rochas ornamentais contam com sistemas de separação sólido-líquido, recirculando entre 70 e 95% da água utilizada no processo. Essa lama é direcionada para bacias de deposição¹⁹.

A maior parte da lama é proveniente dos teares convencionais, constituída por 67% de água, 30% de pó de rocha, 2% de granalha, 1% de resíduos de lâmina de aço e 1% do cal inicial, em peso. Estima-se que sejam geradas 2,2 toneladas de lama por cada metro cúbico de rocha serrado. No entanto, como as indústrias não costumam separar os resíduos por processo (serragem e polimento), a lama final pode conter, ainda, outras substâncias, provenientes das etapas de polimento e resinagem das chapas. No polimento são gerados em torno de 3,5 kg de lama por metro quadrado de chapa²¹.

A explosão da produção de rochas ornamentais, na década de 1990, com o consequente aumento de unidades de beneficiamento, especialmente no estado do Espírito Santo, revelou o problema ambiental do despejo direto dos efluentes das serrarias nos cursos d'água próximos (figura 21). Consideradas como potenciais poluidoras, o Instituto Estadual de Meio Ambiente do Espírito Santo, regulamentou o licenciamento ambiental das serrarias por meio da Instrução Normativa IN 19/2005, dando especial ênfase ao tratamento desses efluentes, com recirculação da água e disposição dos sólidos, não perigosos, mas não inertes, em aterros¹⁹.

Porém, devido à grande quantidade de lama gerada, muitas empresas não dispunham de áreas suficientes para essa disposição o que impedia que obtivessem ou renovassem a licença de operação para sua atividade, motivo pelo qual tiveram que destinar áreas de terreno fora das suas indústrias para a construção dos aterros

de lama, muitas vezes em associação com outras empresas. Isso acabou abrindo as portas para a construção de vários aterros licenciados de deposição da lama onde a lama líquida ou resíduos finos com alto teor de umidade são tratados em tanque de decantação e filtro prensa, para eliminar a água e depositar a lama já seca nas células do aterro. A água separada é retornada à empresa geradora da lama líquida.



Figura 21: Descarte da lama de serragem e polimento de rochas ornamentais nas proximidades de um córrego na cidade de Vitória-ES.

Fonte:

http://midia.folhavitoria.com.br/img/lib/2012/12/poluicao_corrego_sul_26d9bfd8c9.jpg

1.1.5.3. Lama de Marmoraria

Esses resíduos ocorrem na forma de finos e ultrafinos que são formados a partir do processo de recorte, polimento e lustro de peças, confeccionadas das chapas geradas nas serrarias. Essa lama contém cerca de 2% do total de volume processado. Já no ano de 2003, levando-se em conta o beneficiamento mensal de rochas ornamentais apenas no estado de São Paulo foi obtido aproximadamente 7.000 t de pó proveniente da lama.

Em 2013 estimou-se aproximadamente o dobro dessas quantidades¹⁷. O resíduo na forma de lama é armazenado em tanques subterrâneos e sua retirada é realizada com pás e transportada por caminhões ao destino final, como entulho. A figura 22 mostra uma fotografia de um tanque de decantação e reaproveitamento de água no qual a lama é armazenada.



Figura 22: Tanque de decantação de resíduos de rochas gerados no setor de marmoraria.

A lama de marmoraria, assim como a de serraria e polimento tem composição mineralógica diversa, dependendo dos tipos de rochas utilizadas e dos insumos aplicados no beneficiamento. Esses resíduos são classificados como resíduos classe IIA (não perigosos e não inertes) segundo a NBR 10004¹⁹.

1.1.5.4. Retalhos de Chapa em Marmoraria

Esses resíduos são provenientes de sobras e quebras de peças constituindo perdas de 10% a 20% das chapas de rochas beneficiadas. Estes retalhos são muitas vezes acumulados no pátio da própria empresa e numa etapa posterior devem ser encaminhados a um aterro específico. Apesar de ter normalmente 2 a 3 cm de espessura as outras dimensões desses resíduos são bastante variáveis como pode ser observado na figura 23.



Figura 23 Resíduos de retalhos de rochas gerados no setor de marmoraria.

A estimativa da quantidade desses resíduos é muito difícil de ser feita devido à grande diversidade de produtos processados e da contabilização das fontes

geradoras, normalmente pequenas e micro empresas muitas das quais não estão legalizadas e não têm qualquer preocupação com o possível desperdício de recursos naturais e impactos gerados ao meio ambiente.

1.1.6. Aproveitamento de Resíduos de Rochas Ornamentais

Minimizar impactos ambientais, com a diminuição da produção de resíduos, e maximizar o uso dos recursos naturais não renováveis são características fundamentais para as sociedades modernas engajadas na busca do desenvolvimento sustentável. Por isso, em todos os países e, particularmente, no Brasil tanto a legislação ambiental, quanto a Política Nacional de Resíduos Sólidos, requerem que sejam encontradas soluções técnicas para o aproveitamento dos resíduos de rochas ornamentais¹⁹.

A Lei 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, define resíduos como todos os materiais resultantes de atividades humanas em sociedade cuja destinação final não seja seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, exigindo, portanto, soluções técnicas e o gerenciamento para a sua destinação final ambientalmente adequada. Já rejeitos, são todos os resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada como em aterros¹⁹.

Pesquisas de campo nos vários segmentos da indústria brasileira de rochas ornamentais mostraram que a maior parte dos resíduos gerados na industrialização do material é abandonada ou simplesmente usada como aterro de solos. Isto é contrário a atual tendência do setor industrial que visa sempre que possível a reciclagem ou o reaproveitamento de materiais, seja por motivos de regulamentação ambiental, ou para se transformar os rejeitos em matérias-primas.

Principalmente nas regiões onde a fiscalização ambiental é mais efetiva, progressos vêm sendo feitos no sentido de preservar o meio ambiente e, ao mesmo tempo, aumentar a sustentabilidade do setor de rochas ornamentais²². Diversas alternativas para a utilização dos resíduos gerados na lavra e no beneficiamento de rochas ornamentais vêm sendo estudadas.

Além do aproveitamento dos estoques remanescentes, de forma direta, nas pedreiras, na forma de artesanato ou elementos de edificação como a utilização dos

grossos e pedaços de blocos na construção de pontes e muros de arrimo (figura 24), por meio da cominuição, os resíduos grossos, como matacões de rochas, pedaços de blocos, blocos fora de padrão, casqueiros e aparas de serrarias e marmorarias, podem ser transformados em bens vendáveis como britas, areia artificial e material fino para diversas aplicações na construção civil²³.



Figura 24: Reutilização de pedaços de bloco de granito para fabricação de pontes.

Fonte: [http://4.bp.blogspot.com/-Mf4fhs2iCnA/TsYi5vGV-](http://4.bp.blogspot.com/-Mf4fhs2iCnA/TsYi5vGV-vI/AAAAAAAAANI/zMzVKbF_Ez0/s1600/Ponte+no+C%25C3%25B3rrego+Bela+Aurora.jpg)

[vI/AAAAAAAAANI/zMzVKbF_Ez0/s1600/Ponte+no+C%25C3%25B3rrego+Bela+Aurora.jpg](http://4.bp.blogspot.com/-Mf4fhs2iCnA/TsYi5vGV-vI/AAAAAAAAANI/zMzVKbF_Ez0/s1600/Ponte+no+C%25C3%25B3rrego+Bela+Aurora.jpg)

A utilização dos resíduos finos e ultrafinos do beneficiamento de rochas ornamentais é pesquisada a nível mundial já há varias décadas, encontrando-se aplicações na produção de materiais cerâmicos²⁴; na agricultura²⁵ (como corretivo de solos); no tratamento de água²⁶ e esgoto²⁷; na produção de materiais que imitam pedras naturais²⁸; em aditivos ou cargas para asfaltos²⁹, cimentos³⁰, concretos³¹ ou polímeros³².

Ainda no cenário mundial trabalhos mais recentes mostram o potencial de utilização desse pó inorgânico como corretivo de acidez do solo e fertilizante³³, em aterro de solos³⁴, na produção de tijolo³⁵, em substituição da areia na produção de placas de cimento³⁶, na produção de blocos refratários³⁷, na produção de chapas de assemelhados de pedras naturais³⁸, na produção de telhas e ladrilhos cerâmicos³⁹, em cargas para polímeros^{40,41} e agregados para concreto⁴².

Particularmente no Brasil estudos têm sido feitos desde o final da década de 1990 para viabilizar a utilização dos resíduos das indústrias de rochas ornamentais na produção de argamassas^{43,44}, concretos⁴⁵, tijolos^{46,47}, ladrilhos cerâmicos^{48,49,50}, porcelana de isolamento elétrico⁵¹ e também como carga para polímeros⁵².

O estudo da influência dos processos mecânicos de britagem e corte na obtenção dos pós residuais do processamento das rochas ornamentais pode motivar sua utilização em novas aplicações e contribuir para o entendimento de complexos fenômenos de superfície e modificações químicas que possam ocorrer nos minerais presentes nas rochas ornamentais⁵³. Além de estimular o aperfeiçoamento dos processos de extração e beneficiamento das rochas ornamentais e diminuir o passivo ambiental gerado.

1.2. Principais Minerais Formadores dos Granitos

Levando-se em consideração que este projeto de mestrado tem como finalidade principal a investigação e aprofundamento na caracterização físico-química e morfológica de resíduos da rocha ornamental denominada granito Cinza Corumbá (figura 25), um estudo mais detalhado dos três principais minerais formadores desses materiais se fez necessário e será descrito a seguir.

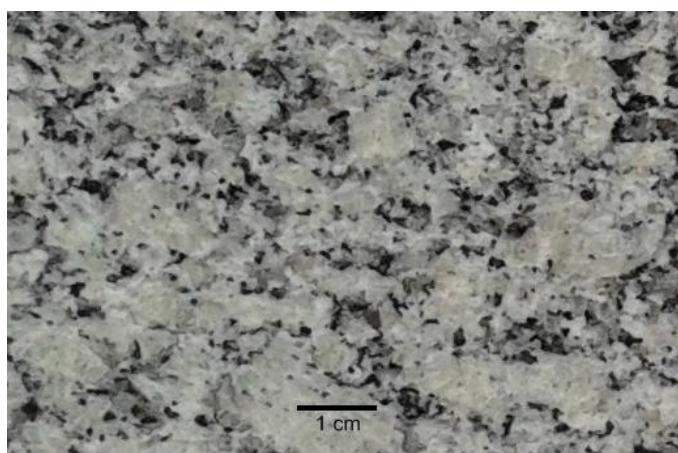


Figura 25 Amostra de granito Cinza Corumbá polido.

1.2.1. Quartzo

O quartzo é um mineral formado por dióxido de silício (SiO_2) pertencente ao grupo da sílica¹¹ que possui nove polimorfos conhecidos dos quais oito são naturais e um artificial. Além dessas formas, relacionadas na Tabela 2, existem duas substâncias essencialmente amorfas: a lechaterielita, que é um vidro de sílica de alta temperatura; e a opala ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), que em baixa temperatura em bacias sedimentares se transforma em quartzo α .

A ocorrência das várias formas de sílica está associada às condições de temperatura e pressão, como mostra o diagrama de fases da figura 26. Os polimorfos de mais alta temperatura possuem estruturas mais expandidas e menor

energia reticular, portanto, são menos estáveis. Além disso, apresentam menor densidade e menor índice de refração¹¹.

Tabela 2: Polimorfos de SiO₂.

Nome	Densidade (g/cm ³)	Índice de Refração (médio)
Quartzo α	2,65	1,55
Quartzo β	2,53	1,54
Tridimita α	2,26	1,47
Tridimita β	2,22	1,47
Cristobalita α	2,32	1,48
Cristobalita β	2,20	1,48
Coesita	3,01	1,59
Stishovita	4,35	1,81
Keatita*	2,50	1,52

* polimorfo sintético

Cada um desses tipos de sílica pode transformar-se em outro. Quando há a transformação de quartzo α em cristobalita ou tridimita ocorre o rompimento das ligações silício-oxigênio e o rearranjo das estruturas. Este processo requer uma grande quantidade de energia e ocorre letamente o que possibilita a ocorrência de fases metaestáveis de um polimorfo no campo de estabilidade do outro.

Quando as modificações envolvem polimorfos de temperatura alta e baixa (como quartzo α em β), que diferem umas das outras somente no comprimento ou na direção das ligações unindo os íons de Si e de O, a mudança é rápida e reversível podendo repetir-se muitas vezes. Contudo, as mudanças de volume provocadas por essas transformações podem gerar defeitos, tais como trincas e empenamentos.

A transformação do quartzo α em β presentes em minérios de manganês durante o tratamento térmico pode ser usada para quebrar as interfaces entre o quartzo e outros minerais presentes. Estudos microscópicos revelaram que o volume de expansão de quartzo inicia a fratura nas interfaces de fase reduzindo o consumo de energia durante a moagem e facilitando a liberação da pirolusita⁵⁴.

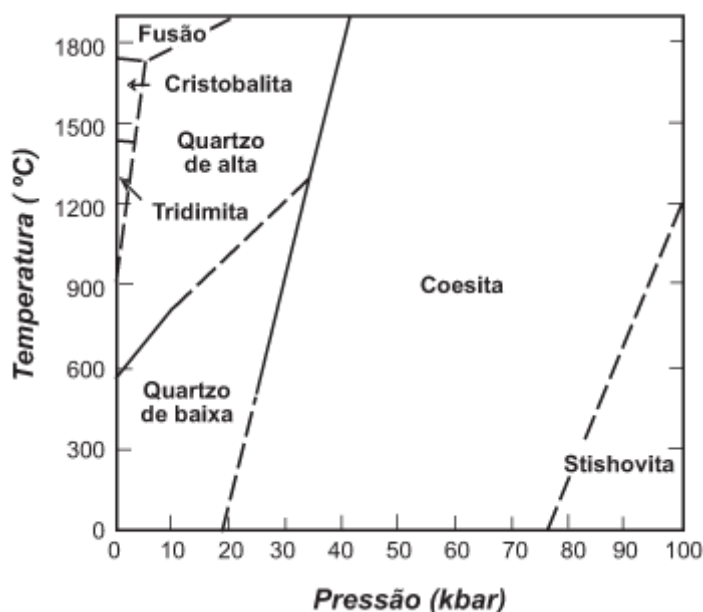


Figura 26: Campos de estabilidade dos principais polímeros cristalinos naturais de SiO_2 em função da temperatura e da pressão listostática.

Fonte: Klein & Dutron, 2012¹¹.

O quartzo α é o principal polímero de sílica encontrado nos granitos. A unidade estrutural básica é um arranjo tetraédrico com um átomo de silício no centro e quatro átomos de oxigênio nos vértices. Os vários tetraedros de dióxido de silício (SiO_2) estão ligados entre si pelos átomos de oxigênio que compartilham duas dessas estruturas (figura 27). O hábito predominante é o de prisma hexagonal terminado em cada extremidade por uma pirâmide também hexagonal (figura 28).

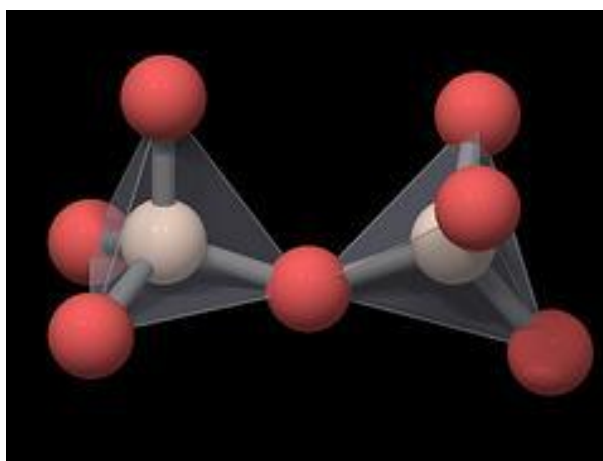


Figura 27: Tetraedros de SiO_2 no quartzo.

Fonte : <http://www.somdecristal.com.br/wp-content/uploads/2015/04/estrutura-cristal-quartzo-tetraedro.jpg>

O quartzo apresenta um arranjo helicoidal, e como esta hélice pode estar dirigida para a direita ou para a esquerda, esse mineral apresenta isomeria óptica. As energias de formação envolvidas em ambos os casos são iguais, portanto, eles têm a mesma probabilidade estatística de ocorrência e numa amostragem aleatória de cristais de quartzo, encontra-se por 50% de cristais levógiros e 50% de cristais dextrógiros.



Figura 28: Estrutura tridimensional do quartzo.

Fonte : <http://www.somdecristal.com.br/wp-content/uploads/2015/04/estrutura-cristal-quartzo-tetraedro.jpg>

Esse mineral apresenta uma alta estabilidade térmica e química reagindo apenas com flúor, ácido fluorídrico ou álcalis fortes⁵⁵. O quartzo é um mineral duro (sete na escala de Mohs). Quando puro é incolor, porém, pode apresentar as mais diversas cores devido à presença de impurezas na rede. Pode apresentar brilho vítreo a graxo. Não apresenta planos preferenciais de clivagem, e é caracterizado por fratura conchoidal.

A ausência de centro de simetria em cristais de quartzo e a sua transparência resultam em propriedades características, com destaque para a atividade óptica e a piezoelectricidade que tornam este mineral importante para a indústria óptica e eletro-eletrônica. O quartzo é ainda fortemente piroelétrico, ou seja, é capaz de gerar temporariamente um potencial elétrico quando aquecido ou esfriado.

O quartzo apresenta inúmeras variedades que se classificam em geral em dois grupos: as macrocristalinas, com cristais estruturados e bem desenvolvidos; e as criptocristalinas, com formas parciais englobadas em massas minerais amorfas. O cristal de rocha, a ametista e os quartzos leitosos, amarelo-rosado e fosco são

variedades pertencentes ao primeiro grupo. No segundo grupo se incluem o sílex, a calcedônia, o jaspe, a ágata, o olho-de-tigre e o heliotrópio

O Brasil possui as maiores reservas conhecidas de quartzo piezoelétrico do mundo com o total estimado em 26,8 Mt. Entretanto, exporta o material bruto e importa o produto manufaturado principalmente da Europa. Os maiores centros de produção de quartzo localizam-se nos estados do Pará, Minas Gerais, Santa Catarina, São Paulo e Bahia⁸.

Os cristais de melhor qualidade são destinados à indústria óptica, eletrônica e de instrumentação (considerados os maiores consumidores), enquanto os de qualidade inferior destinam-se à indústria em geral (abrasivos, cerâmica, metalúrgica). Os principais setores de consumo são as indústrias de relógios eletrônicos, de automóveis, jogos eletrônicos, equipamento de telecomunicações, computadores e equipamentos médicos.

Algumas variedades cristalinas bem formadas como o quartzo rosa, o citrino, a ametista e a ágata são amplamente utilizados como material ornamental ou gema e para fins esotérico-filosóficos diversos. O quartzo natural, obtido a partir de depósitos comuns de areia, saprolitos graníticos e agregados monominerálicos de quartzo (arenitos e quartzitos), é utilizado na construção civil na produção de argamassas, concreto, ladrilhos e vidros. As aplicações da sílica vítrea, obtida a partir de quartzo ou sinteticamente, na indústria de fibras ópticas⁵⁶ são muito importantes.

Devido à transparência tanto para porções no infravermelho como ultravioleta do espectro, o quartzo é usado em muitas aplicações em aparelhos científicos como a fabricação lentes e prismas de equipamentos ópticos, polarizadores e fotômetros. Fibras de quartzo são usadas para a fabricação de balanças de precisão extremamente sensíveis. O tijolo de quartzo, altamente refratário, é utilizado na fundição de minérios calcários.

Por suas propriedades piezelétricas, o quartzo é utilizado para medir e controlar a frequência dos impulsos elétricos. Também são de uso corrente os relógios de quartzo, baseados nessas propriedades, e as lâmpadas de quartzo, ou de quartzo e iodo, muito empregadas em iluminação para cinema e fotografia.

1.2.2. Feldspatos

Os feldspatos podem ser considerados derivados da sílica formados quando cátions Al^{3+} substituem espécies Si^{4+} nas posições tetraédricas da rede cristalina. Esse fato gera os ânions alumino silicatos, o que provoca a incorporação de cátions monovalentes como K^+ e Na^+ ou bivalentes como o Ca^{2+} ou raramente Ba^{2+} , para manter o equilíbrio das cargas.

Quando somente um Si^{4+} é substituído por um Al^{3+} (por unidade de fórmula), a estrutura pode ser neutralizada por um cátion monovalente (como K^+ ou Na^+), porém, quando há a substituição de dois cátions silício por dois alumínio por unidade de fórmula pode haver a incorporação de um cátion bivalente como o Ca^{2+} a fim de manter a neutralidade da rede¹¹. Estas relações podem ser descritas no esquema da figura 29. Quanto maior for a quantidade de alumínio maior será a quantidade de cátions bivalentes.

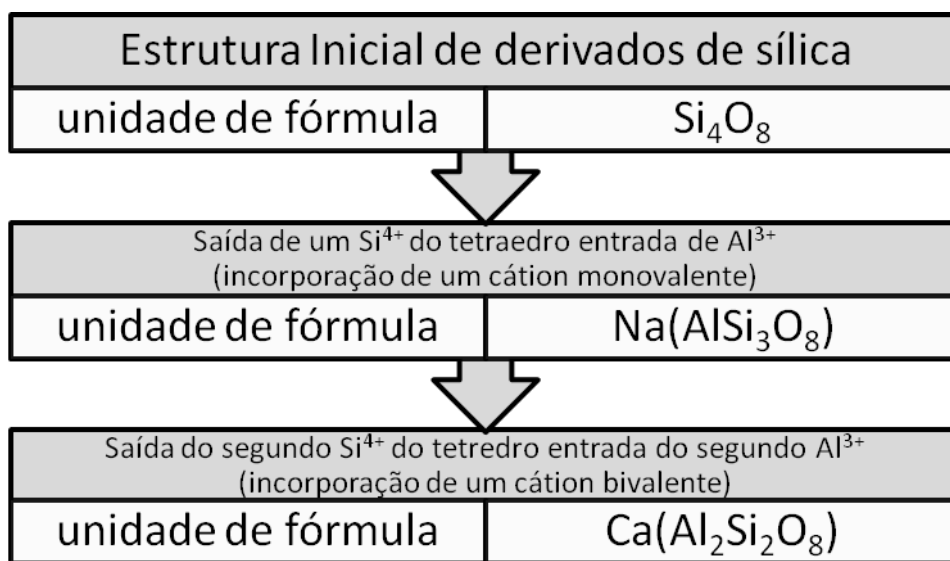


Figura 29: Esquema de representação por fórmulas da substituição de cátions Si^{4+} por Al^{3+} nos feldspatos.

A composição da maioria dos feldspatos pode ser expressa em termos dos minerais KAlSi_3O_8 (Ortoclásio-Or), $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (Albita-Ab) e $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (Anortita-An). Na figura 30, um diagrama de fases ternário mostra as possibilidades de existência de um feldspato com uma fórmula química e nomenclatura definida.

Neste diagrama os constituintes principais são os feldspatos ortoclásio (Or), albita (Ab) e anortita (Na), cada um dos quais, com 100% de K, Na ou Ca, respectivamente ocupando um dos vértices do triângulo. Na aresta que une o Ortoclásio a Albita está a série dos feldspatos alcalinos, ou alcali-feldspatos. Na

aresta entre Albita e Anortita, está a série dos plagioclásios. Não há praticamente condições de compostos cristalinos com composição intermediária entre Anortita e Ortoclásio.

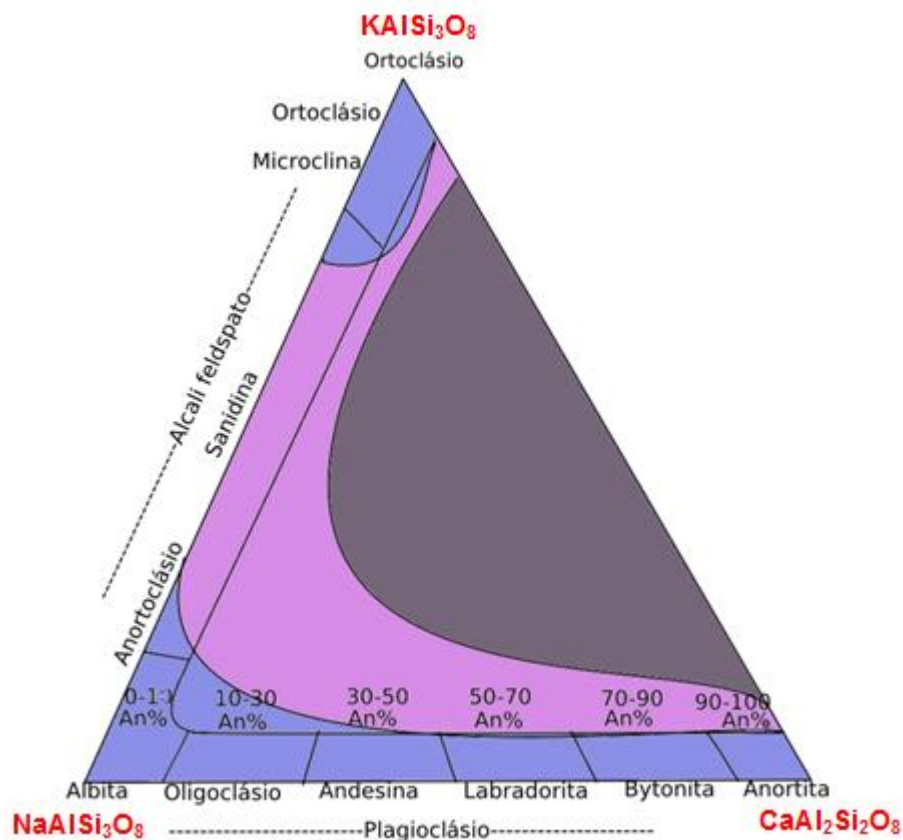


Figura 30: Diagrama de fases ternário – nomenclatura dos principais silicatos.

Fonte: http://www.dicionario.pro.br/images/thumb/b/b0/Feldspar_stability.jpg/400px-Feldspar_stability.jpg

Em relação ao diagrama de fases da figura 30 a cor cinza escura representa a região onde não existem soluções sólidas estáveis dos feldspatos nem a alta temperatura (havendo, portanto mais de uma fase). Na região rosa, existem feldspatos estáveis entre 950 e 650°C e na região azul há feldspatos estáveis à temperatura ambiente.

Os diversos tipos de feldspatos apresentam estruturas parecidas (figura 31), consistindo de cadeias arqueadas de anéis de quatro membros que se estendem na mesma direção. As cadeias são unidas por ligações iônicas através dos cátions.

O contorno quadrado em blocos das cadeias, conferido pelos anéis de quatro membros, encontra sua expressão morfológica na clivagem em ângulo reto que resulta no hábito tabular característico dos feldspatos (figura 32). Os planos de clivagem não rompem normalmente as ligações Si-O, mas sim as ligações iônicas.

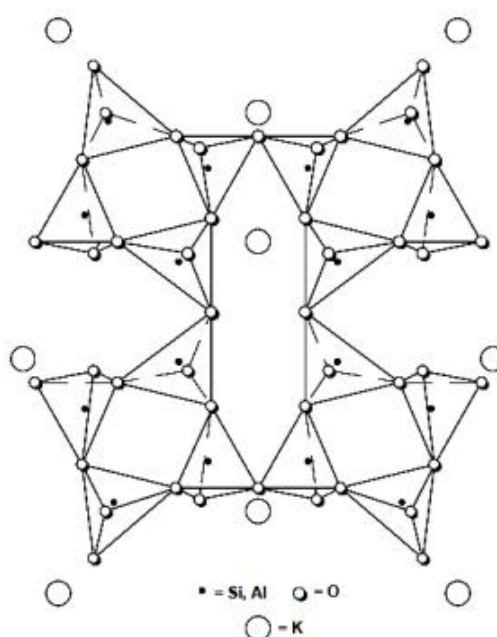


Figura 31: Estrutura básica de um feldspato.

Fonte: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/342/284>

A dureza dos feldspatos varia entre 6 e 6,5 na escala de Mohs (diamante apresenta dureza 10^{11}) e a densidade varia entre 2,55 a 2,76 g/cm³. Os feldspatos são os principais responsáveis pela cor das rochas silicáticas, conferindo as colorações avermelhada, rosada e creme-acinzentada a esses materiais. Nos granitos mais claros, com menor quantidade de minerais ferro-magnesianos, o quartzo e o feldspato compõem normalmente entre 85% e 95% da rocha.



Figura 32: Amostra de feldspato com faces retas, clivagem de 90° e hábito tabular.

Fonte: <http://www.cristaisaquarius.com.br/media/product/dd1/feldspato-bruto-64g-45c.jpg>

Os feldspatos constituem o grupo de minerais mais abundantes da crosta terrestre. A proporção relativa entre as séries dos feldspatos alcalinos e plagioclásios é um parâmetro fundamental para a classificação das rochas ígneas. São comuns também em algumas rochas sedimentares e na maioria das rochas metamórficas.

Na produção mundial de feldspato destacam-se: Turquia, Itália, China, Tailândia, França, Irã, Japão, Espanha, e Índia. A produção brasileira tem pequeno destaque e em 2013 correspondeu à aproximadamente de 1,2% do total mundial. Os principais estados produtores do Brasil são o Paraná responsável por mais da metade da produção do feldspato bruto nacional, seguido por Santa Catarina, Paraíba, Rio Grande do Norte, Minas Gerais e Bahia⁵⁷.

Os minerais do grupo dos feldspatos têm grande aplicação na indústria cerâmica, particularmente na produção de pisos, revestimentos e porcelanas⁵⁸, além de usos em vidros, esmaltes, polidores, prótese dentária, construção civil⁸, fertilizantes⁵⁹, cargas em polímeros⁶⁰ e em sabão em barras.

1.2.3. Micas

Mica é a denominação dada a um grupo de minerais formados por lâminas de alumino silicatos hidratados (principalmente silicatos de potássio) pertencentes ao grupo dos filossilicatos. Estes minerais apresentam diferenças em suas composições químicas e propriedades físicas. Podem conter, além dos elementos silício, oxigênio, alumínio e hidrogênio inerentes as estruturas citadas, os íons dos elementos sódio, ferro, magnésio, além de cálcio, titânio, cloro e flúor com menor incidência¹¹.

No grupo dos filossilicatos três dos quatro oxigênios dos tetraedros de SiO_4 são compartilhados com tetraedros vizinhos, gerando uma razão $\text{Si}:\text{O} = 2:5$. Especificamente, no subgrupo das micas cátions Al^{3+} substituem parcialmente o Si^{4+} nos sítios tetraédricos, isso gera uma carga negativa em excesso na superfície das folhas das estruturas que são compensadas pela presença de cátions⁵⁵ como o K^+ .

As lâminas de silicatos são compostas por seis anéis interconectados que são responsáveis por uma típica estrutura simétrica pseudo-hexagonal monoclinica ou triclinica com clivagem laminar. Na figura 33 pode ser observado a estrutura lamelar da biotita e o plano de clivagem normal à figura na posição dos átomos de potássio.

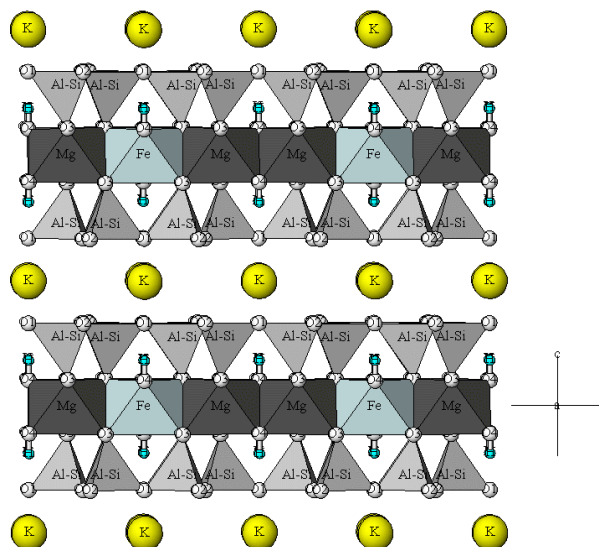


Figura 33: Representação da estrutura da mica biotita.

Fonte: <https://staff.aist.go.jp/nomura-k/common/STRUCIMAGES/Biotite.gif>

Esses minerais tem alta flexibilidade, baixa condutividade térmica e elétrica e alta resistência a mudanças bruscas de temperaturas. Sua dureza na escala de Mohs varia entre 2,0 e 2,5 e sua densidade entre 2,6 e 3,1 cm³. Apresentam hábito foliado ou micáceo apresentando camadas bem definidas como pode ser observado na figura 34. No grupo das micas os três minerais de maior importância comercial são a moscovita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$), a flogopita ($\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$) e a biotita ($\text{K}_2(\text{Mg},\text{Fe})_{6-4}(\text{Fe},\text{Al},\text{Ti})_{0-2}\text{Si}_{6-5}\text{Al}_{2-3}\text{O}_{20}(\text{OH},\text{F})_4$).



Figura 34: Amostra de mica enfatizando o hábito foliado ou micáceo.

Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/50/MicaSheetUSGOV.jpg>

A mica é comercializada na sua forma mais simples como folhas que tem preço de acordo com suas dimensões e defeitos que prejudicam seu corte ou perfurações. As folhas de mica são classificadas de acordo com a espessura bloco-

block (maior que 18 μm), películas-*film* (entre 18 e 4 μm) e lâminas-*splitting* (menor que 4 μm), com uma área útil de no mínimo 2,5 cm².

As micas ocorrem em rochas magmáticas, metamórficas e sedimentares, em concentrações muito variáveis, mas sua exploração industrial é feita, predominantemente nos pegmatitos. É comum ocorrer depósitos econômicos de flogopita em áreas de sedimentos metamorfizados. Micas do tipo floco-*flake* podem ser encontradas em muscovita ou biotita. Outra forma de mica é uma fina muscovita denominada sericita.

Os principais produtores mundiais de mica são a China, a Rússia, os Estados Unidos da América (EUA) e a Finlândia⁶¹. No Brasil, os principais estados produtores são Tocantins, Minas Gerais, Rio Grande do Norte e Ceará. Estas reservas estão associadas principalmente às províncias pegmatíticas na Região Nordeste e em Minas Gerais, além de micaxistos em Tocantins e Minas Gerais.

As micas possuem várias aplicações industriais, particularmente na indústria eletroeletrônica⁶². Devido à sua elevada resistência dielétrica e resistividade, baixa perda de potência e baixo coeficiente de temperatura esses minerais podem ser usados em janelas de microondas, capacitores, transistores, isolantes, resistores, mísseis teleguiados, lasers, filtros ópticos especiais, pirômetros e reguladores térmicos.

Outras aplicações importantes podem ser citadas como nas lamas de perfuração de poços petrolíferos, em papel parede, pigmento, em tintas, carga para polímeros e também em aplicações cosméticas como esmaltes de unha, batons, sombras e cremes⁸.

1.3. Mecanoquímica

1.3.1. Definição

A mecanoquímica estuda as mudanças químicas ou físico-químicas das substâncias submetidas à aplicação de energia mecânica⁶³. O efeito dos esforços mecânicos nas propriedades de materiais é um tópico de crescente interesse científico que tem implicações tanto na síntese de novas substâncias como em novos processos industriais⁶⁴.

A ação de forças mecânicas provoca alterações estruturais nas superfícies, tais como a contração ou dilatação, a formação de partículas ou afloramento de

subsuperfícies decorrentes da abrasão, e ocasionalmente também há mudança de fases. Esta ativação mecânica ocasiona a formação de espécies em estados excitados e de defeitos estruturais que resultam na emissão de fótons, elétrons ou fragmentos de sólidos. Pode também provocar distorções no retículo cristalino e aquecimento local, o que pode tornar possíveis algumas reações pouco usuais ⁶³.

Através de ações mecânicas de moagem é possível converter um sólido cristalino num produto amorfo. Uma grande vantagem de aplicações de métodos mecanoquímicos de síntese sobre métodos tradicionais é evitar a necessidade de grandes volumes de solvente o que faz da mecanoquímica uma importante aliada da chamada “química verde”⁶⁵. Um importante ramo da mecanoquímica é a triboquímica (do grego: *tribein* = atrito), que trata da alteração no comportamento dos sólidos sob a ação mecânica⁶³.

A relação entre o comportamento de sólidos e a físico-química de superfícies foi formulada em 1928 por Rehbinder⁶⁶ que estudou o efeito da diminuição na energia de superfície pela adsorção de surfactantes sobre as propriedades mecânicas de cristais de calcita, gipsita e mica.

Segundo Rehbinder⁶⁶, a resistência e a dureza dos sólidos eram influenciadas pela sua interação com o meio ambiente. Ele propôs que a adsorção de moléculas ativas enfraquecia as ligações entre os elementos de superfície da rede cristalina, diminuindo a resistência dos cristais à ruptura.

As interações adsorbato-adsorbato e sólido-adsorbato influenciam diretamente na reconstrução da nova superfície sólida⁶⁷. Assim, considera-se atualmente⁶⁶ que a adsorção de componentes ativos afetam as propriedades mecânicas do sólido antes e depois da fratura.

Ao ser cortado ou fraturado, um sólido gera uma nova superfície expondo orbitais vazios que são muito reativos e podem interagir com outras espécies químicas. Pode haver ainda uma interação entre os orbitais vazios causando um rearranjo da camada externa da rede, de tal forma que a estrutura da superfície será diferente do corpo do material⁶⁸.

A ruptura do sólido pode ocorrer pela propagação de uma trinca e a liberação da chamada energia de deformação elástica, ou seja, parte da energia armazenada no material quando ele é deformado elasticamente. Além disso, durante o processo de extensão da trinca, suas faces são novas superfícies que dão origem a um

aumento na energia de superfície do sistema. Existe concentração de energia na ponta da trinca e, portanto uma alta densidade de energia no local⁶⁶.

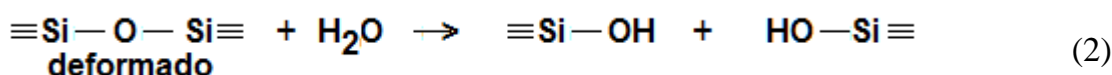
Griffith⁶⁹ demonstrou que a tensão crítica (σ_c) exigida para romper um material frágil está relacionada com o módulo de Young (E), a energia interfacial do sólido no meio ambiente (γ_s) e a metade do comprimento da trinca (a) pela relação descrita na equação 1.

$$\sigma_c = \sqrt{2E\gamma_s/\pi a} \quad (1)$$

De acordo com a equação 1, uma diminuição da energia interfacial causada pela adsorção de moléculas do meio ambiente na superfície dos materiais causará uma queda na tensão de ruptura do sólido.

A redução da força de ruptura em sólidos iônicos como as rochas pode ser influenciada pelo contato desses sólidos⁶⁶ com sais fundidos, água, soluções aquosas de eletrólitos ou surfactantes.

Em particular, os minerais constituintes das rochas podem reagir com a água, porém essa reação é muito lenta em condições ambientes. A deformação mecânica acelera o processo e pode haver, por exemplo (equação 2), hidrólise da ligação siloxano (Si–O), o que facilita o processo de ruptura⁶⁶.



Para reações deste tipo foi proposto o termo “hidrólise mecanicamente estimulada” enfatizando o aspecto mecanoquímico do processo. Nesse caso, pode se observar também a influência direta do ambiente úmido facilitando a ruptura das ligações Si–O⁷⁰.

1.3.2. Exemplos de Estudos e Aplicações da Mecanoquímica

A síntese de sólidos e moléculas por métodos mecanoquímicos é um método utilizado há muito tempo. Sua importância química foi registrada por Faraday, que em 1820 demonstrou a redução do AgCl a Ag⁰ por trituração em um almofariz com pistilo de uma mistura de AgCl e Zn⁰. Progressos significativos ocorreram na mecanoquímica através das pesquisas de Walthère Spring e M. Carey Lea no final do século 19⁶⁴.

Spring, segundo Takacs⁶⁴, estudou o efeito da pressão nas mudanças de fase e nas reações químicas com o objetivo de compreender a formação de minerais no interior da terra. As pesquisas de Carey Lea, segundo Takacs⁶⁴, relacionavam-se

à preparação e às transformações de haletos, alótropos e colóides de prata por meios mecanoquímicos.

Durante a primeira metade do século 20 a mecanoquímica desenvolveu-se lentamente; minerais, compostos inorgânicos e polímeros foram os principais temas de investigação. Esta situação começou a mudar por volta de 1960, quando vários grupos dedicados principalmente à mecanoquímica foram criados na União Soviética e na Europa Oriental⁶⁴.

Por exemplo, os estudos de Thiessen e Heinicke⁷¹ se concentravam na triboquímica e em aspectos fundamentais da mecanoquímica. O principal interesse do grupo de Novosibirsk⁷² foi a investigação de reações inorgânicas, o grupo de Kosice⁷³ se concentrava no uso da mecanoquímica no processamento mineral, Juhász e Opoczky⁷⁴ investigaram a ativação mecânica de silicatos.

Muitos avanços na mecanoquímica de sólidos têm sido feitos recentemente gerando perspectivas de aplicações em diversos campos como na metalurgia, na ciência de materiais e na medicina. Bujňáková⁷⁵ et al., estudaram a influência da moagem na extração de cobre e arsênio do mineral enargita (Cu_3AsS_4).

Achimovičová et al.⁷⁶, sintetizaram nanopartículas do semicondutor seleneto de chumbo (PbSe), por meio de moagem de alta energia de uma mistura de pós de chumbo e selênio num moinho de bolas planetário. Wu e Ho⁷⁷, preparam nanopartículas de sulfeto de arsênio (As_2S_2), utilizado no tratamento de câncer, utilizando moagem a frio de misturas de sulfeto de arsênio (As_2S_2), trióxido de arsênio (As_2O_3), polivinilpirrolidona (PVP) e dodecil sulfato de sódio (SDS).

A síntese mecanoquímica de nanocompostos possibilita a obtenção de materiais de forma reprodutível com elevado rendimento e em condições de operação simples e fáceis⁷⁸.

As características mecanoquímicas de um sistema podem permitir a realização de sínteses sem a presença de solventes permitindo que o trabalho seja executado em condições ambientalmente amigáveis e essencialmente livre de resíduos.

Muitos outros exemplos de estudos mecanoquímicos podem ser citados como a produção de fertilizantes a partir da moagem de rochas⁷⁹, a ativação química e dissolução de minerais⁸⁰, a contaminação de pó de quartzo durante a moagem⁸¹ e efeitos da moagem sobre procedimentos de flotação de minérios⁸².

O grupo de pesquisa do professor Fernando Galembeck tem antecedentes nessa área. Como exemplos podem ser citados o estudo do efeito de aditivos na moagem de celulose⁸³, a preparação de nanocompósitos a partir de látices e dispersões aquosas com nanopartículas de argilas⁸⁴ e triboeletrização de polímeros isolantes⁸⁵.

1.3.3. Cominuição

Cominuição é o conjunto de operações de diminuição do tamanho de partículas de minerais executado por ação mecânica de maneira controlada para atingir um objetivo específico como a facilitação do transporte, aumento da taxa de dissolução, utilização ou concentração de minerais importantes numa mistura como uma rocha⁸⁶.

As operações de cominuição podem produzir reações mecanoquímicas nos sólidos processados devido à energia aplicada e à interação das novas superfícies formadas com o próprio material, com o meio ambiente e com os moedores. Isso pode levar à formação de novos compostos ou à alteração de propriedades de superfície dos materiais de origem. Além disso, a cominuição pode provocar mudanças de fase ou alterações químicas no material inicial⁸⁷.

Na cominuição das rochas ornamentais as partículas são fragmentos de rochas, formadas por minerais. Os minerais são materiais cristalinos, onde os átomos se encontram em arranjos tridimensionais. A configuração da estrutura cristalina é fortemente determinada pelos tipos de ligações químicas entre os átomos, íons e moléculas constituintes, bem como de suas valências e tamanhos. Essas ligações interatômicas são intensas a pequena distância, e podem ser quebradas com a aplicação de esforços externos.

Quando uma partícula é submetida a esforços mecânicos superiores aos limites de ruptura, ocorre a propagação de trincas já existentes e a iniciação de novas trincas em seu interior, o que causa a fragmentação. A redução de tamanho ocorre através da aplicação de pressão (compressão), impacto cinético entre o sólido e o corpo moedor (impacto) ou através de atrito da superfície de partículas do material com a superfície dos moedores (abrasão).

As deformações de um sólido causadas por esforços mecânicos podem ser classificadas como elásticas ou plásticas. A deformação elástica é reversível, cessado o esforço mecânico o sólido retorna à sua forma original. A deformação

plástica é permanente, ligações químicas são quebradas e ocorre um rearranjo dos átomos. Assim, cessado o esforço mecânico, o sólido não retorna a forma original⁶⁹.

Durante a fragmentação, as forças de contato deformam as partículas criando um campo de tensões, e as partículas respondem criando trincas ou se deformando plasticamente. O processo de fragmentação pode ocorrer pelos mecanismos de abrasão, estilhaçamento e clivagem, os quais dependem do nível de energia aplicada⁸⁸ e da forma como o esforço mecânico é executado. Uma representação esquemática dos mecanismos de fragmentação de partículas pode ser observada na figura 35⁸⁹.

A fragmentação por abrasão ocorre quando as tensões aplicadas não são suficientes para causar a fratura das partículas originais. Os esforços mecânicos causam fragmentação superficial, causando uma pequena redução de tamanho e gerando grande quantidade de finos.

A distribuição de tamanho das partículas geradas (figura 35a) no processo de abrasão mostra um pico das partículas finas e outro das partículas grossas com tamanho próximo das partículas de origem. Estes dois picos são separados por um intervalo de tamanhos que não contém partículas.

Na fratura por estilhaçamento, esforços compressivos causam a fragmentação intensa da partícula original gerando uma ampla faixa de fragmentos como ilustrado na Figura 53b,. O processo de quebra consiste em uma série de etapas nas quais a partícula inicial é fraturada e sucessivas fraturas ocorrem sequencialmente nas partículas geradas até que toda a energia para a fratura seja dissipada. Este mecanismo de fratura é o mais comum em moinhos e britadores.

Na fratura por clivagem, são formados fragmentos grossos e também partículas finas próximo ao ponto de aplicação dos esforços mecânicos. A distribuição de tamanho das partículas geradas é estreita, mas pode ser bimodal, como mostrado na Figura 35c.

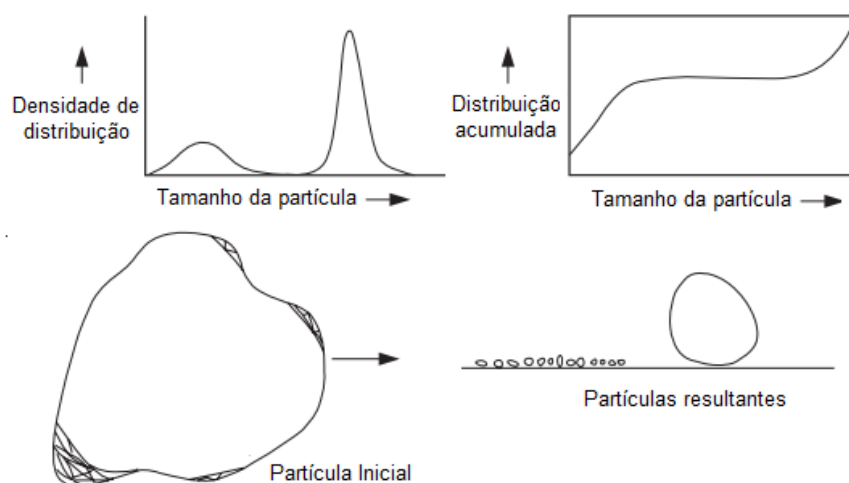
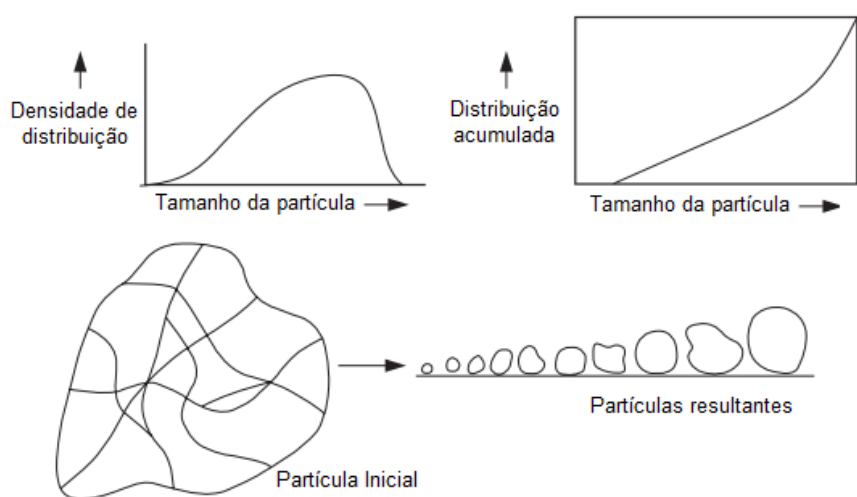
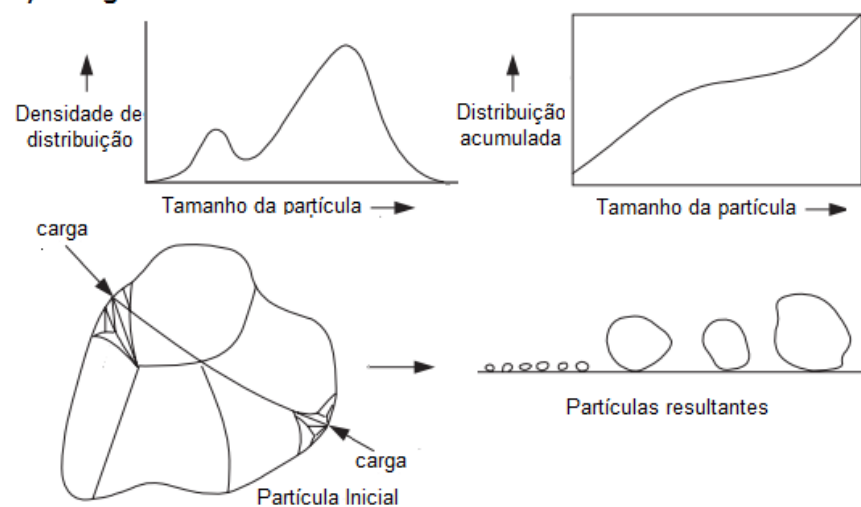
a) Abrasão**b) Estilhaçamento****c) Clivagem**

Figura 35: Possíveis mecanismos de fratura durante a fragmentação de rochas.
(Adaptado de King, 2001).

O processo de cominuição de rochas compreende diversos estágios que se aplicam desde a extração das rochas das pedreiras por explosivos, até o material ser fragmentado por britagem ou moagem e estar adequado ao processo industrial subsequente⁹⁰.

Pode se definir a britagem de rochas como uma operação de cominuição grosseira, na qual o tamanho dos insumos na alimentação é da ordem de um metro a centímetros, e o tamanho do produto britado é da ordem de centímetros⁸⁶.

Na britagem a quebra de partículas ocorre principalmente pela ação de esforços compressivos ou de impacto. Os esforços compressivos são aplicados, em geral, por meio do movimento periódico de aproximação e afastamento de uma superfície móvel contra outra fixa como num britador de mandíbulas, cujo esquema está mostrado na figura 36.

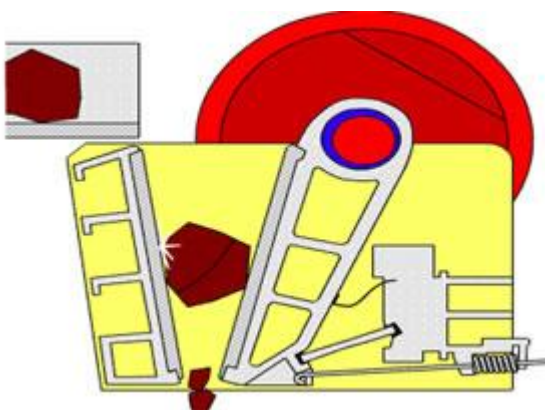


Figura 36: Esquema de um britador de mandíbulas.

Fonte: <http://www.hjcrusher.com.pt/minn/13a.jpg>

A moagem é o último estágio da cominuição de rochas. Neste estágio as partículas são reduzidas, pela combinação de esforços de impacto, compressão, abrasão e atrito.

A moagem de rochas é caracterizada por ser uma operação de cominuição fina, na qual o tamanho dos insumos na alimentação é da ordem de centímetros, e o tamanho do produto moído é da ordem de micrômetros ou até nanômetros⁸⁶.

Em geral, na cominuição de rochas, os processos de britagem são feitos a seco enquanto a moagem é feita a úmido. Além de vantagens como a facilidade de transporte do mineral, a dissipação do calor e a não emissão de poeiras silicosas, o processo a úmido consome menos energia, por exemplo, devido ao efeito

Rehbinder⁶⁶. Porém, a utilização do processo a seco é justificada pela menor abrasão dos britadores.

1.3.4. Corte de Chapas de Rochas

O corte de materiais é um processo mecânico bastante comum na indústria de beneficiamento de rochas ornamentais. Nas marmorarias, este processo é executado com discos diamantados (figura 37) que são constituídos por uma base circular de aço com segmentos, aderidos na borda, compostos de uma liga metálica (geralmente de bronze ou cobalto, estanho, tungstênio e níquel) e partículas de diamante (de diâmetro entre 150 a 1000 μ m)⁹¹.

A operação de corte é efetuada sobre a superfície do material e ocorre pela trituração e deformação plástica da rocha logo abaixo da ferramenta de corte, seguido da formação de uma “cratera” devido ao crescimento de fissuras laterais desde a ponta da ferramenta de corte até a superfície. A elevada temperatura atingida na lâmina de corte e no material a cortar exige por vezes a utilização de fluidos refrigerantes como água ou ar frio.

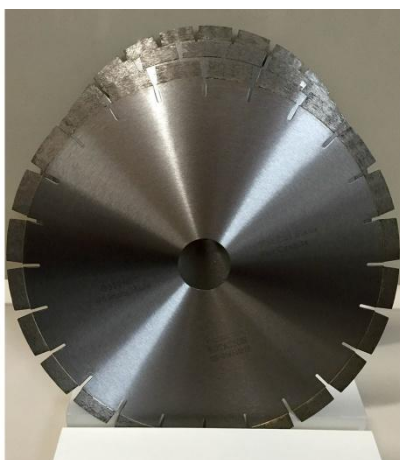


Figura 37: Disco diamantado utilizado no corte de rochas ornamentais.

Fonte: <http://sarzicomex.com.br/wp-content/uploads/2015/06/disco-serra1.jpg>

A interação entre as lâminas de corte, os minerais sólidos e os meios refrigerantes aliados aos processos mecânicos envolvidos no corte e a grande concentração de calor durante o corte das rochas pode gerar transformações mecanoquímicas. Entretanto, vários pesquisadores têm estudado o desempenho da serra diamantada no processo de corte de rocha sem levar em conta os aspectos mecanoquímicos do processo⁹².

Segundo Tönshoff et al.⁹³ e Yilmaz⁹⁴, a utilização da água no processo de corte de rochas por discos diamantados tem a finalidade de diminuir a temperatura do processo e reduzir a poeira gerada no corte. Nestes trabalhos, são abordadas características e propriedades dos abrasivos aplicados às ferramentas de corte, principalmente as diamantadas. Não se considera o efeito Rehbinder e a diminuição da energia utilizada ou mudanças físicas ou químicas ocorridas nos minerais da rocha durante o processo a úmido.

2. Objetivos

Este projeto de mestrado tem como finalidade principal a caracterização físico-química e morfológica de pós de resíduos da rocha ornamental denominada granito Cinza Corumbá, gerados tanto no corte como na britagem de retalhos dessa rocha proveniente do beneficiamento desse granito no setor de marmoraria.

Outro propósito do trabalho foi avaliar a influência dos processos mecânicos de britagem e de corte nas superfícies dos pós analisados:

No processo de adsorção do azul de metileno em frações dos pós de britagem e corte, em diferentes granulometrias.

Na avaliação da molhabilidade de pastilhas dos pós de britagem e corte através do ângulo de contato aparente da água com pastilhas dos pós.

3. Materiais e métodos

3.1. Preparação das Amostras

Obteve-se dois tipos de amostras na indústria Marmoraria Ico, situada em Salto no estado de São Paulo, da seguinte forma:

a) Amostras provenientes da lama abrasiva de corte (ALC) - Resíduos de chapas de 2 cm de espessura da rocha denominada, granito Cinza Corumbá, foram cortados a úmido na forma de ladrilhos com dimensão de 30cm x 15cm utilizando uma serra diamantada (figura 38).



Figura 38: Corte de ladrilhos com dimensão de 30X15 cm de resíduos de chapas de granito Cinza Corumbá por serra diamantada.

A lama abrasiva resultante do processo de corte (figura 39) foi coletada segundo a norma ABNT NBR 10007⁹⁵. O material coletado foi colocado em lonas de polietileno, seco ao ar por três dias no pátio da empresa e depois em estufa a 60°C, durante 5 horas, quando apresentaram massa constante. Após esse processo, o material obtido apresentou-se na forma de pó de cor acinzentada.



Figura 39: Lama de corte de ladrilhos de resíduos de chapas de granito Cinza Corumbá coletada na indústria Marmoraria Ico, situada em Salto – SP.

Em seguida, o pó resultante foi quarteado (figura 40) dividindo-se o material em quatro partes iguais, sendo tomadas as partes opostas que formaram uma nova amostra descartando as partes restantes. As partes não descartadas foram misturadas e o processo de quarteamento concluído.

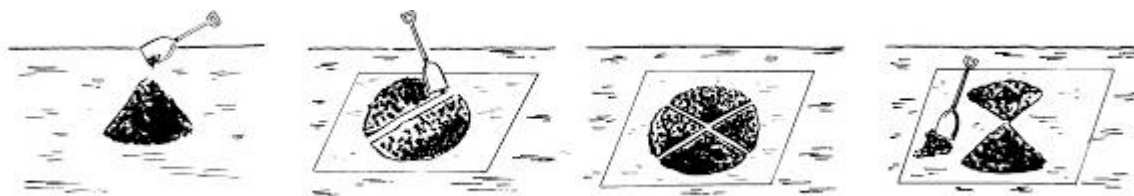


Figura 40: Esquema do procedimento de quarteamento de amostras.

Fonte: [http://1.bp.blogspot.com/-](http://1.bp.blogspot.com/-wQjYDNXjHrg/UeUiWniPLkI/AAAAAAAAABEM/xP3A33KUGAM/s1600/quartear.jpg)

[wQjYDNXjHrg/UeUiWniPLkI/AAAAAAAAABEM/xP3A33KUGAM/s1600/quartear.jpg](http://1.bp.blogspot.com/-wQjYDNXjHrg/UeUiWniPLkI/AAAAAAAAABEM/xP3A33KUGAM/s1600/quartear.jpg)

b) Amostras provenientes da britagem de resíduos de corte (ABC) – No corte dos ladrilhos mencionados no item anterior foram gerados resíduos da rocha com dimensões de 5 a 20 cm de comprimento, 3 a 5 cm de largura e 2 cm de espessura (figura 41) denominadas aparas de corte.

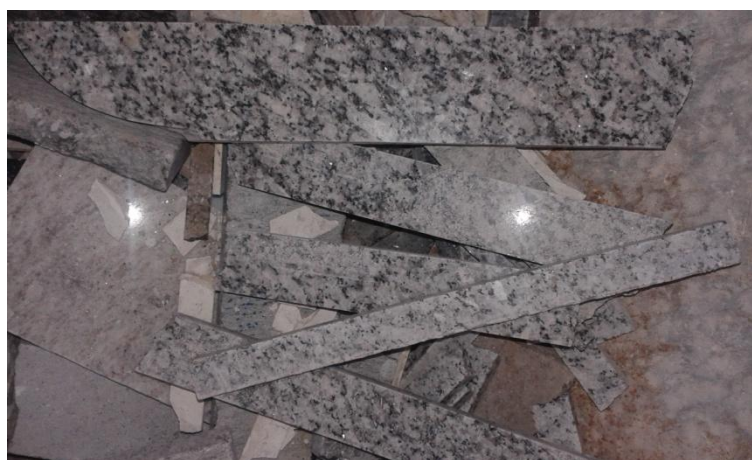


Figura 41: Aparas de corte ladrilhos de resíduos de chapas de granito Cinza Corumbá.

As aparas de corte de resíduos foram colocadas em lonas de polietileno, secas ao ar por três dias no pátio da empresa e depois britados a seco em um britador de mandíbulas de dois eixos (figura 42) produzido na própria empresa. O material britado foi coletado, seco e quarteado seguindo o procedimento adotado na lama de corte. Após esses processos, o material apresentou-se na forma de uma mistura de pedaços pequenos (brita 1 e 2 de 14 a 30 mm de diâmetro) com pó cinza aderido.



Figura 42: Britador de mandíbulas utilizados na britagem de aparas de ladrilhos de resíduos de chapas de granito Cinza Corumbá.

3.2. Análise Granulométrica

A caracterização granulométrica e a separação dos pós em frações de dimensões diferentes foram feitas através da técnica de peneiramento^{96,97}. Esse método é o mais largamente difundido para a separação e determinação de tamanho de partículas e cobre uma faixa de 20 μm a 125 mm.

Amostras dos pós de corte e de britagem foram passadas através de uma série de peneiras com a finalidade de separar o material sólido em frações com partículas de dimensões próximas para posterior caracterização físico-química e morfológica.

Para o pó de corte, o procedimento foi o seguinte: pesou-se 200,00 g do pó transferindo quantitativamente para o conjunto de peneiras de malhas 8, 12, 35, 60, 80, 100, 200, 250, 325 e 400 mesh previamente tarado. Agitou-se as peneiras por 20 minutos, e em seguida cada peneira foi pesada.

Em relação à amostra de britagem (ABC), o ensaio foi realizado da seguinte forma: 5000 g do material foram transferidos para uma peneira de abertura livre 4,75 mm para separação do cascalho da fração mais fina. Em seguida, este material mais fino (denominado pó de britagem) foi submetido ao mesmo procedimento utilizado na amostra do pó de corte.

Para todas as análises realizadas (salvo exceções descritas) foram utilizadas amostras das frações dos pós retidos nas peneiras de malha 325 mesh (diâmetro médio de 52 μm) dos pós de corte e de britagem.

3.3. Densidade

Na determinação da densidade dos pós de corte e de brita utilizou-se o picnômetro de hélio multi-volume Micromeritics, modelo Accupyc II 1340. O princípio de operação do aparelho baseia-se na redução do volume da cela de amostra devido à presença do sólido. Esta diferença de volumes equivale ao volume da amostra e é determinada medindo-se o deslocamento de gás He no interior da cela.

3.4. Área Superficial

A determinação de área superficial específica dos pós foi feita utilizando-se a análise de múltiplos pontos do analisador de área superficial e tamanho de poros Quantachrome, modelo NOVA 4200e. O princípio da análise é obter o volume de adsorvato (nitrogênio) nas CNTP, adsorvido ao sólido em uma série de pressões relativas e tratar estes dados através do método BET⁹⁸.

3.5. Difração de Raios-X

Nos ensaios de raios-X dos pós de corte e britagem foi utilizado o difratômetro de raios-X modelo XRD 7000 da Shimadzu. Os difratogramas foram obtidos na faixa de $2\theta = 5-80^\circ$, utilizando-se a linha K_α do Cu, gerada a 40kV com corrente de 35mA e passo angular (2θ) de $0,02^\circ$.

Utilizando-se a lei de Bragg (equação 3), a distância interplanar (d) é determinada pelo conhecimento do comprimento de onda (λ), da fonte de raios-X (linha K_α do Cu) e do ângulo de difração 2θ de cada linha do difratograma.

$$\lambda = 2d\sin\theta \quad (3)$$

A identificação dos minerais mais abundantes nas amostras foi feita pela comparação dos difratogramas gerados com padrões de referência organizados em fichas do banco de dados ICDD PDF2⁹⁹, utilizando-se o software X'Pert HighScore Plus e a quantificação das principais fases foram calculadas pelo método Rietveld¹⁰⁰ através do software DBWS¹⁰¹.

Amostras dos pós de corte e britagem retidos nas peneiras de 250 e 325 mesh, com diâmetro médio respectivo de 162 e 52 μm , foram analisadas. Além disso, foram obtidos difratogramas da fração magnética dos pós de uma amostra da fração retida a 325 mesh. A parte magnética dos pós foi separada com o auxílio de um ímã, posto em contato com amostras de 20,00 g dos resíduos obtendo-se aproximadamente 0,10 g de pó magnético aderido ao ímã.

3.6. Fluorescência de Raios-X

As análises de fluorescência de raios-X foram realizadas em um espectrômetro sequencial de fluorescência de raios-X por dispersão de comprimento de onda da Shimadzu modelo XRF 18000.

Os espectros foram obtidos utilizando-se uma fonte de raios-X de ródio com voltagem de 40kV, corrente de 95mA, com velocidade de varredura de 8°/min e passo de 0,1°. As análises foram feitas em pastilhas prensadas a cinco toneladas de pressão durante um minuto e constituídas de 0,80 g dos pós e 0,20 g de acetato de celulose.

3.7. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na microscopia eletrônica de varredura utilizou-se o microscópio Jeol, modelo JSM6340 F, com uma microsonda de raios-X EDS da Noran Instruments, modelo Series II X ray Analyser.

As amostras foram preparadas colando-se um pedaço de fita adesiva dupla face sobre um cilindro de latão de 1cm de diâmetro por 1 cm de altura. Em seguida, o pó foi espalhado sobre a fita e o conjunto (porta amostra, fita, pó) foi metalizado com uma camada de ouro-paládio e analisado, utilizando voltagem de aceleração de 15 kV.

3.8. Espectroscopia no Infravermelho de Refletância Difusa com Transformada de Fourier (DRIFTS)

Para a espectroscopia no Infravermelho de refletância difusa com transformada de Fourier (DRIFTS), 100mg dos pós foram colocados no dispositivo de refletância difusa (que permite coletar a radiação espalhada pelo pó), e este último foi acoplado ao espectrômetro infravermelho ABB Bomen MB series 100. O sistema foi mantido em contato com o ar atmosférico para a calibração e obtenção

do *background* a fim de minimizar os efeitos de absorção de gás carbônico e vapor d'água.

3.9. Adsorção de Azul de Metileno

Os ensaios de adsorção do corante azul de metileno foram realizados seguindo um plano fatorial de dois fatores e dois níveis descritos na Tabela 3. O fator granulometria se refere ao tamanho médio da fração de partículas retidas entre as peneiras de malha 200 e 250 mesh no nível mais alto e entre as peneiras de malha 250 e 325 mesh no nível mais baixo.

A ação mecânica de obtenção dos pós foi escolhida como o segundo fator do planejamento fatorial. Atribuiu-se o nível mais alto às frações de pó de corte devido à maior quantidade de material nas frações analisadas e o nível mais baixo foi atribuído ao pó de britagem.

Tabela 3: Fatores e níveis do plano fatorial 2^2 para adsorção de azul de metileno.

Efeitos	Descrição	Nível alto	Nível baixo
		+	-
1	Granulometria	67,5 μm	52 μm
2	Ação Mecânica	Corte	Britagem

*Dm = diâmetro médio das partículas obtido pela média das peneiras próximas.

Para os ensaios de adsorção de azul de metileno (massa molar = 319,85 g/mol) adicionou-se 1,00 g dos pós e 50 mL de uma solução do corante de concentração 50 mg/L ($1,563 \times 10^{-4}$ mol/L) num béquer de 150 mL. Os sistemas foram mantidos sob agitação durante 10 minutos e a temperatura ambiente foi controlada em 25 ± 1 °C.

Transferiu-se 20 mL da mistura para tubos de ensaio e centrifugou-se por 5 minutos. Coletaram-se alíquotas de 5 mL do líquido sobrenadante para as medidas de absorbância feitas num espectrofotômetro Micronal L-36, usando comprimento de onda de 665 nm.

Considerando-se que a absorbância das soluções de azul de metileno na faixa estudada é proporcional à concentração em mol/L do corante em água, determinou-se a concentração final da solução após a adsorção pela comparação com a absorbância da solução inicial e calculou-se a massa adsorvida por grama de pó, através do volume da solução utilizada e da massa molar do azul de metileno.

Em seguida, calculou-se a eficiência da adsorção do azul de metileno (E_{ads}) subtraindo-se da unidade a razão da diferença da massa inicial do corante (m_i) e da massa final (m_f) dividida pela massa inicial (m_i) multiplicando-se o resultado por 100% como descrito na equação 4.

$$E_{ads} = \left(1 - \frac{(m_i - m_f)}{m_i}\right) \times 100\% \quad (\text{equação 4})$$

3.10. Molhabilidade dos Pós de Resíduos de Rochas Ornamentais

Existem várias técnicas experimentais para estudar a molhabilidade de sistemas sólidos que se baseiam no espalhamento do sólido sobre o líquido, como a norma ABNT NBR 13242:2014 utilizada para agrotóxicos e pesticidas¹⁰². Também há técnicas que se baseiam no espalhamento do líquido sobre o sólido, como é caso do método da gota séssil utilizado neste trabalho¹⁰³.

Para estudar a molhabilidade dos resíduos foram preparadas pastilhas dos pós de corte e de britagem retidos na peneira de 325 mesh. Pesou-se 3,0 g do material, que foi submetido a uma pressão de 3 atm. Utilizou-se um suporte de nylon mostrado na figura 42 para conter as amostras devido à baixa adesão dos pós.

Gotas de água destilada e deionizada, com volume de 0,05 mL, foram colocadas sobre as pastilhas com o auxílio de uma pipeta Pasteur (figura 43). Os experimentos foram feitos na temperatura ambiente de 25°. As imagens foram registradas e processadas com auxílio do software de tratamento de imagens Photoscape 3.7.



Figura 43: Suporte de nylon utilizado para as pastilhas de pó corte e britagem nos ensaios de ângulo de contato.

Determinou-se a tangente do perfil da gota líquida com a superfície sólida obtendo-se a medida do ângulo de contato aparente pelo método da gota séssil com o objetivo de analisar a molhabilidade dos pós.

Apesar do método da gota séssil ser o mais utilizado para se medir o ângulo de contato de superfícies sólidas com líquidos como a água, devido a sua facilidade de execução e reprodutibilidade de resultados, o método não leva em conta a porosidade e a rugosidade do material¹⁰⁴.

A rugosidade do material não impossibilita a medida do ângulo de contato, mas influencia as conclusões obtidas a partir dessas medidas. Utilizando-se o método da gota séssil, por exemplo, não é possível a determinação de grandezas como o trabalho de adesão entre os sólidos e os líquidos estudados¹⁰⁴.



Figura 44: Adição de gota de água destilada e deionizada à pastilha do pó de rochas ornamentais para estimativa do ângulo de contato nos ensaios de molhabilidade.

4. Resultados e Discussão

4.1. Análise Granulométrica

Os resultados obtidos para as análises granulométricas do pó de corte e britagem são mostrados na figura 45 e na Tabela 4. Enquanto a figura 46 e a Tabela 5 mostram os resultados para o pó de britagem.

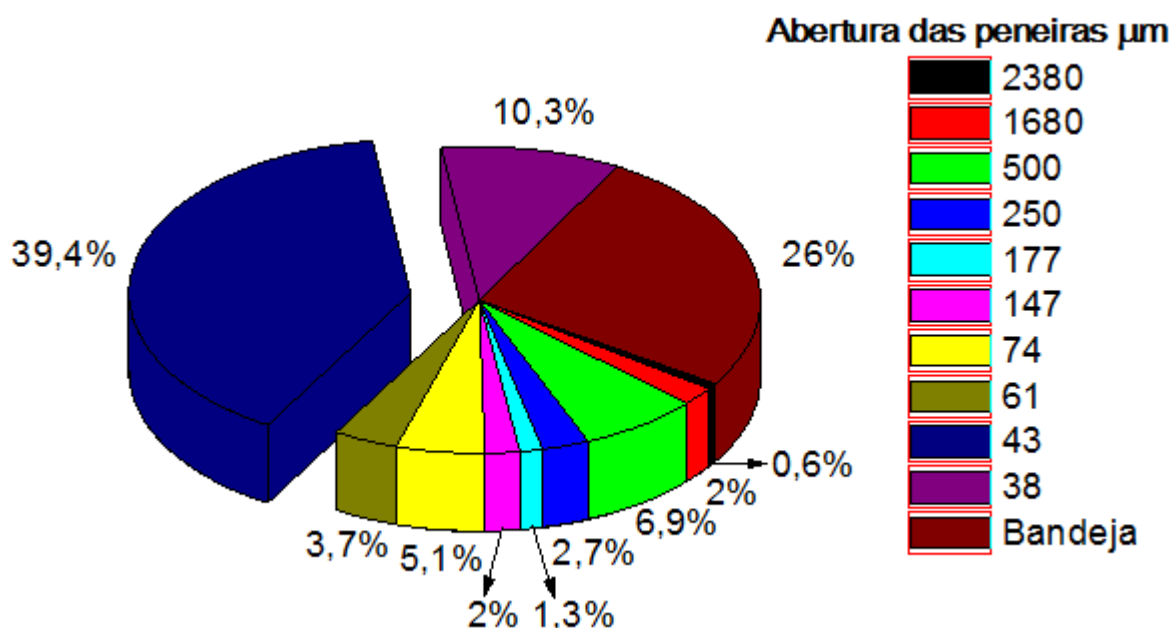


Figura 45: Distribuição granulométrica do pó de corte do granito Cinza Corumbá (abertura das peneiras x porcentagem em massa retida em cada peneira).

A análise da figura 45 indica que a fração predominante das partículas no pó de corte está retida na peneira de abertura 43 μm (325 mesh) como a peneira anterior tem abertura 61 μm (250 mesh) pode se considerar que 39,4% das partículas do pó de corte tem um diâmetro médio (média aritmética das aberturas das peneiras) de 52 μm .

A Tabela 4 mostra a porcentagem retida acumulada (soma dos percentuais retidos nas peneiras superiores, com o percentual retido na peneira em estudo) das frações do pó de corte. Observa-se que cerca de 20% das partículas ficam retidas (porcentagem retida acumulada de 20,6%) na peneira de 200 mesh e, portanto aproximadamente 80% das partículas do pó de corte têm dimensões menores que 74 μm .

Tabela 4: Porcentagem retida acumulada do pó de corte do granito Cinza Corumbá.

Peneiras (mesh)	Abertura das peneiras i (μm)	Porcentagem retida acumulada (%)
8	2380	0,6
12	1680	2,6
35	500	9,5
60	250	12,2
80	177	13,5
100	147	15,5
200	74	20,6
250	61	24,3
325	43	63,7
400	38	74,0
Bandeja	0	100

Em relação à amostra de britagem, cerca de 90% do material peneirado apresentou dimensões maiores que 4,75 mm e não foi analisado. O material mais fino, denominado pó de britagem, foi levado ao conjunto de peneiras utilizado.

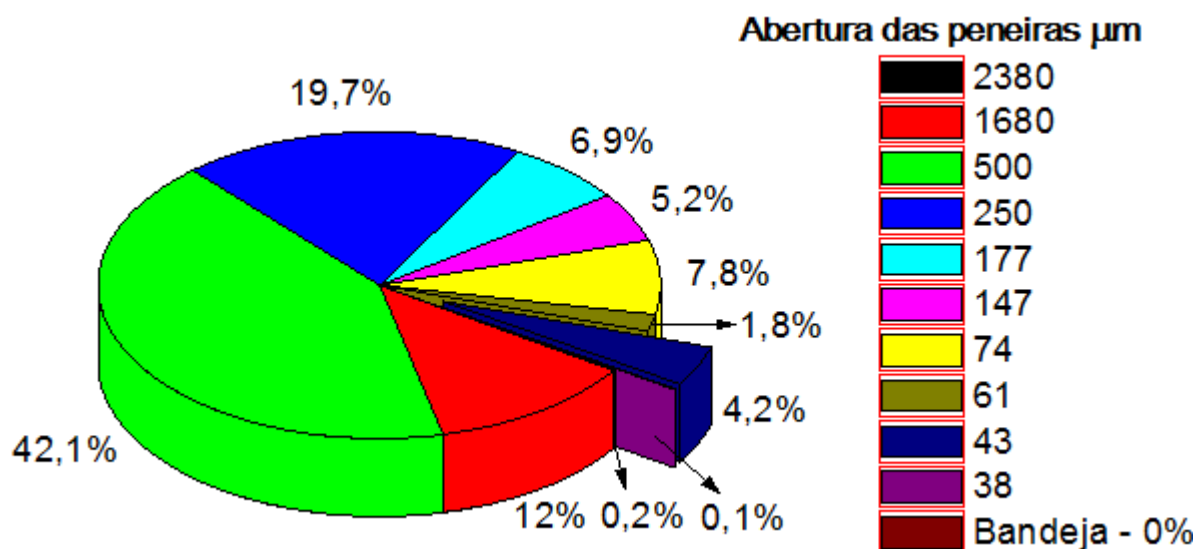


Figura 46: Distribuição granulométrica do pó de britagem do granito Cinza Corumbá (abertura das peneiras x porcentagem em massa retida em cada peneira).

A análise da figura 46 indica que a fração predominante das partículas no pó de britagem está retida na peneira de abertura 500 μm (35 mesh) como a peneira

anterior tem abertura de 1680 μm (12 mesh) pode se considerar que 42,1% das partículas do pó de britagem tem um diâmetro médio de 1090 μm .

A Tabela 5 mostra a porcentagem retida acumulada do pó de britagem. A análise desses resultados mostra que 74 % das partículas da amostra analisada são maiores que 250 μm .

Tabela 5: Porcentagem retida acumulada do pó de britagem do granito Cinza Corumbá.

Peneiras (mesh)	Abertura das peneiras i (μm)	Porcentagem retida acumulada (%)
8	2380	0,2
12	1680	12,2
35	500	54,3
60	250	74,0
80	177	80,9
100	147	86,1
200	74	93,9
250	61	95,7
325	43	99,9
400	38	100
Bandeja	0	1,000

Resolveu-se adotar a fração retida na peneira de 325 mesh (52 μm de diâmetro de médio) dos pós devido ao seu pequeno diâmetro e por apresentar quantidade de amostra suficiente para as demais análises.

Frações de partículas menores prevalecem no pó de corte enquanto que no pó de britagem há predominância das partículas maiores. Resultados semelhantes foram obtidos por Destefani e colaboradores¹⁰⁵ que utilizaram resíduos de serragem de blocos de vários tipos de granitos e pós britagem de granitos como agregados finos em concreto. As diferenças nas distribuições granulométricas dos pós estão relacionadas com os tipos de fragmentação gerados pelos processos mecânicos envolvidos¹⁰⁶.

Na obtenção do pó de corte, o mecanismo de abrasão é predominante e as partículas sofrem a ação de esforços normais, do ponto de vista geométrico, que

geralmente, não são capazes de gerar a ruptura das partículas, ou esforços cisalhantes na superfície.

Estes esforços causam apenas fragmentação superficial e o resultado é uma redução limitada de tamanho da partícula inicial e um grande número de finos como obtido na distribuição granulométrica do pó de corte (figura 47).



Figura 47: Frações separadas por peneiramento do pó de corte do granito Cinza Corumbá.

Na obtenção do pó de britagem, predomina o mecanismo de estilhaçamento, onde altas taxas de aplicação de energia são utilizadas em condições de esforços compressivos. Estes esforços geram partículas mais grossas (figura 48) que no pó de corte.



Figura 48: Frações separadas por peneiramento do pó de britagem do granito Cinza Corumbá.

4.2. Densidade

As densidades dos pós (d) foram obtidas através da equação 5, onde (m) é a massa das amostras dos pós adicionados ao picnômetro de He e (v) volume de cada amostra.

$$d = \frac{m}{v} \quad (4)$$

A Tabela 6 mostra os valores obtidos para as densidades dos pós analisados. Pode ser observado que a amostra de corte apresenta uma densidade maior que a de britagem.

Tabela 6: Densidade das amostras do pó de corte de britagem retidas a 325 mesh.

Amostra	Densidade (g/cm³)
Pó de corte	2,73 (±0,03)
Pó de britagem	2,58 (±0,03)

A Tabela 7 apresenta a densidade dos três principais grupos e minerais¹¹ presentes na rocha granítica analisada no local de amostragem e pode ser observado que a densidade varia de 2,55 a 3,20 g/cm³.

Comparando os dados das Tabelas 6 e 7, pode-se concluir que os resultados obtidos concordam com os valores esperados, existindo uma proximidade da composição das amostras, apesar do pó de corte ser mais denso que o pó de britagem.

A diferença de densidade dos pós pode estar associada à maior quantidade dos minerais mais densos como a biotita no pó de corte em relação ao pó de britagem ou a possível existência de poros fechados internos no pó de britagem¹⁰⁷.

Tabela 7: Densidade dos principais minerais presentes em rochas graníticas.

Minerais	Densidade (g/cm³)
Quartzo	2,65
Feldspatos	2,55 a 2,76
Biotita	2,8 a 3,20

4.3. Determinação de Área Superficial

Os resultados da determinação de área superficial dos pós podem ser vistos na Tabela 8. A área superficial do pó de britagem é aproximadamente 45% maior que a do pó de corte.

A diferença de área superficial das amostras pode estar relacionada ao fato de a fragmentação das partículas na britagem ocorrer sob maior tensão e sem orientação preferencial comparada com a fragmentação das partículas de corte, o que pode gerar maior irregularidade, rugosidade e até mesmo porosidade nas partículas do pó de britagem em relação às partículas do pó de corte.

Os valores de área superficial dos pós (diâmetro médio de 52 μm) descritos na Tabela 8 são menores que os que os valores obtidos na literatura a partir de outros resíduos de rochas analisados^{108,47} (2,18 a 3,14 m^2/g) onde estão presentes nas amostras partículas com tamanhos que variam de 147 até 2 μm .

Tabela 8: Área superficial do pó de corte e britagem do granito Cinza Corumbá retido a 325 mesh.

Amostra	Área superficial (m^2/g)
Pó de corte	1,98 ($\pm 0,04$)
Pó de britagem	2,85 ($\pm 0,03$)

4.4. Difração de Raios-X.

Os pós de corte e de britagem têm como constituintes principais: quartzo, feldspatos, mica e titanita. A figura 49 apresenta na parte superior os difratogramas para as amostras dos pós de corte (ALC 250) e de britagem (ABC 250) retidos nas peneiras de 250 mesh e na parte inferior os difratogramas das amostras dos pós corte (ALC 325) e de britagem (ABC 325) retidos nas peneiras de 325 mesh.

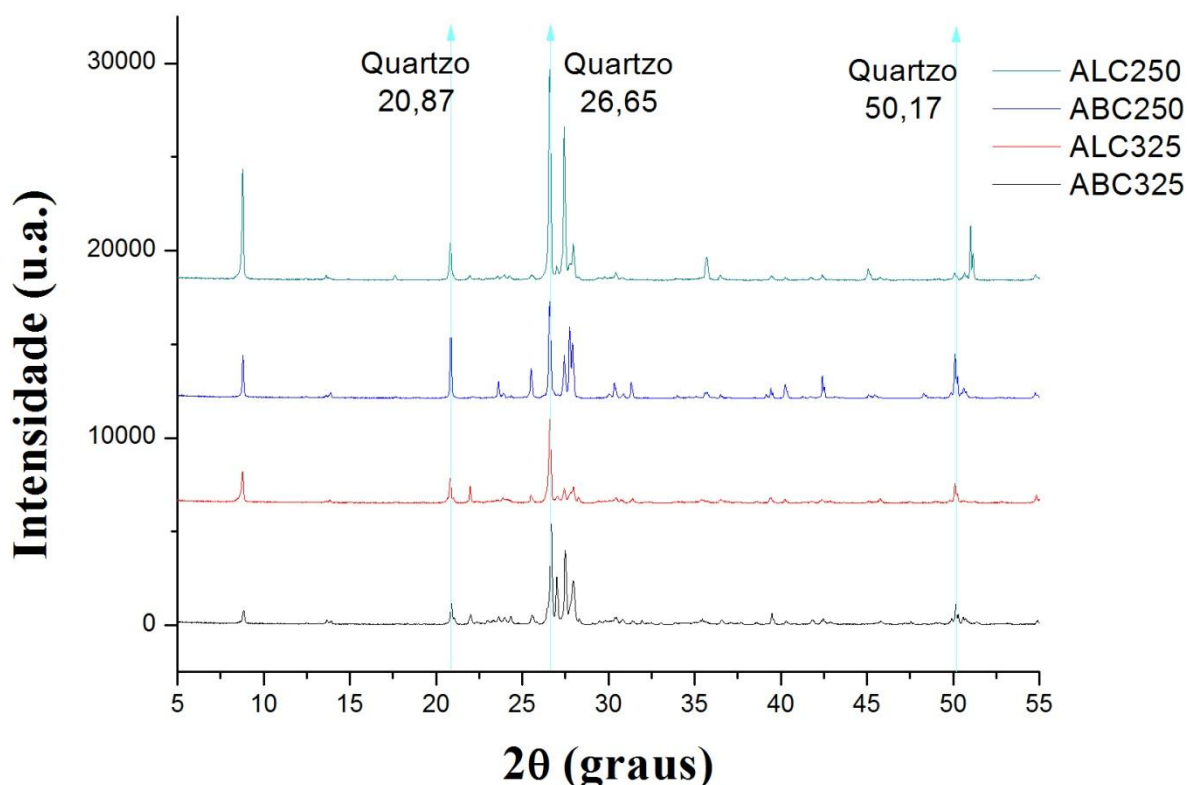


Figura 49: Difrátogramas de raios-X dos pós de corte (ALC) e britagem (ABC) do granito Cinza Corumbá, os números 250 e 325 indicam a malha em mesh da peneira na qual o pó foi retido.

Dos difratogramas mostrados na figura 49, obteve-se os valores de 2θ dos principais picos. Aplicando-se a Lei de Bragg (equação 3), determinou-se as distâncias interplanares mostradas na Tabela 9. Foram marcados na figura 49 os três principais valores de 2θ do quartzo, para exemplificar a identificação dos minerais encontrados nos pós analisados.

Os minerais encontrados nas amostras de pó de corte e britagem do granito Cinza Corumbá pela difração de raios-X são mostrados na Tabela 9. A Tabela 10 mostra uma relação dos minerais encontrados no granito Cinza Corumbá segundo a literatura¹⁰⁹.

Os difratogramas de raios-X das frações dos pós retidos nas peneiras de 250 e 325 mesh provenientes do corte e da britagem mostraram-se bastante complexos, comprovando a origem do material, uma vez que os pós analisados são provenientes de uma rocha e podem apresentar diversos tipos de minerais como visto na Tabela 9.

Tabela 9: Compostos Identificados nos difratogramas de raios-X dos pós de corte e britagem mostrados na figura 49.

Composto	Linhas (2 θ)	d (Å)	Classificação
Microclíneo	27,52; 21,02; 27,09	3,24; 4,22; 3,29	Feldspato Potássico
Oligoclásio	27,99; 22,03; 27,77	3,19; 4,03; 3,21	Feldspato Plagioclásio
Andesina	28,03; 27,82; 21,97	3,18; 3,20; 4,04	Feldspato Plagioclásio
Quartzo	26,65; 20,87; 50,17	3,34; 4,25; 1,82	Grupo da sílica
Biotita	8,84; 27,40; 26,74	10,00; 3,25; 3,33	Mica
Titanita	27,49; 29,77; 34,30	3,24; 3,00; 2,61	Ortossilicato

Na análise da Tabela 9 pode ser observada a presença dos três grupos de minerais principais formadores do granito (quartzo, feldspatos e mica) além da titanita. Outros minerais relacionados na Tabela 10 e que não foram detectados na análise dos difratogramas (por exemplo, o zircão), podem estar em baixa concentração na amostra, o que dificulta a sua detecção.

Tabela 10: Possíveis minerais presentes na constituição mineralógica no granito Cinza Corumbá¹⁰⁹.

Mineral	Fórmula
Microclínio	$K_{95-100\%}Na_{0-5\%}AlSi_3O_8$
Oligoclásio	$Na_{90-70\%}Ca_{10-30\%}AlSi_3O_8$
Andesina	$Na_{70-50\%}Ca_{30-50\%}AlSi_3O_8$
Quartzo	SiO_2
Biotita	$K(Mg,Fe)_3(OH,F)_2(Al,Fe)Si_3O_{10}$
Titanita	$CaTiOSiO_4$
Pirita	FeS_2
Muscovita	$KAl_2Si_3AlO_{10}(OH,F)_2$
Apatita	$Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$
Zircão	$ZrSiO_4$
Allanita	$(Ca,Fe,La,Ce,Y,Na)_2(Al,Mg,Mn,Fe)_3Si_3O_{12}OH$
Sericita	$KAl_2(OH)_2(AlSi_3O_{10})$
Hematita	Fe_2O_3
Magnetita	Fe_3O_4

Observando-se os difratogramas da figura 49 não é possível detectar a presença de substâncias amorfas nas duas amostras apesar do registro da

obtenção de quartzo amorfo por métodos mecanoquímicos ter sido feito na literatura, há bastante tempo¹¹⁰.

Porém, o aparecimento da fase amorfa para o SiO_2 acontece com partículas de dimensões nanométricas, obtidas por moagem¹¹⁰ e neste trabalho os sólidos analisados que possuem os menores tamanhos foram retidos entre as peneiras 250 e 325 mesh e com partículas de diâmetro médio estimado em 52 μm .

Na análise da Tabela 9 observa-se que os mesmos minerais foram encontrados nos dois pós, porém os difratogramas da figura 49 mostram que as intensidades dos picos são diferentes. Por exemplo, os picos relacionados à biotita são mais intensos na amostra do pó de corte que no pó de brita.

Análises quantitativas das amostras foram feitas nas duas frações dos pós utilizando o método de Rietveld¹¹¹ com o auxílio do software DBWS¹⁰¹. Através deste método obteve-se uma simulação digital dos difratogramas a partir dos dados cristaloquímicos da totalidade das fases cristalinas encontradas nas amostras¹¹².

Os dados calculados foram subtraídos dos difratogramas observados, sendo as diferenças minimizadas através da adequação nos parâmetros da estrutura cristalina dos minerais e das funções que descrevem o formato dos picos¹¹³.

A figura 50 mostra um exemplo dos difratogramas obtidos experimentalmente e calculados teoricamente para a amostra do pó de corte retida na peneira de 325 mesh. Em relação às demais frações, utilizou-se o mesmo procedimento com a finalidade de obter a proporção entre as fases.

Os erros estimados estão relacionados com as divergências entre os difratogramas teóricos e experimentais. Os menores erros foram obtidos com a proporção molar entre as fases. Os resultados da análise quantitativa, feita pelo método Rietveld, são apresentados na Tabela 11.

As fases referentes ao feldspato potássico (microclíneo) e os plagioclásios como o oligoclásio e andesina, respectivamente, devido a sua semelhança de constituição e características de fratura e clivagem foram somadas e descritas como feldspatos na Tabela 11. Em relação à mica o constituinte determinado foi somente a biotita como descrito na Tabela 9.

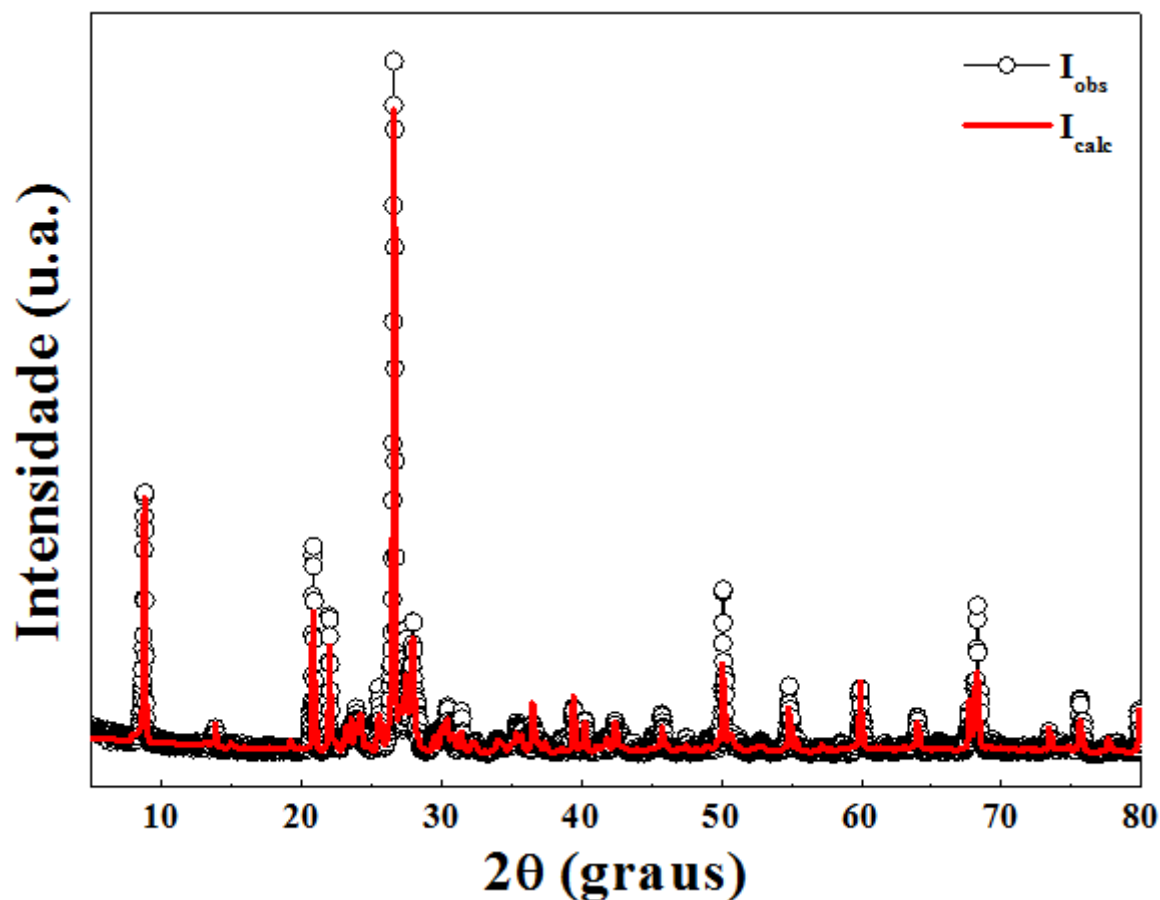


Figura 50: Difratogramas de raios-X do pó de corte retido na peneira de 325 mesh utilizados na análise quantitativa pelo método Rietveld.

I_{obs} : intensidades obtidas experimentalmente. I_{calc} : intensidades calculadas pelo método Rietveld.

Na análise dos resultados da proporção dos minerais mostradas na Tabela 11 observa-se que nas frações do pó de corte, o quartzo predomina na fração menor retida a 325 mesh (ALC325) e os feldspatos prevalecem na fração maior (ALC250). Este resultado pode estar relacionado à maior facilidade de fragmentação do feldspato (devido à presença de planos de clivagem) em relação ao quartzo no processo de corte.

Comparando-se a quantidade de mica nas amostras de corte, observa-se uma maior quantidade na fração retida a 250 mesh em relação à fração retida a 325 mesh, porém, essa diferença é muito menor que a encontrada com os demais minerais. Essa diferença pode estar relacionada à facilidade de clivagem da mica em lâminas gerando partículas maiores.

Tabela 11: Proporções entre as fases minerais, obtidas pelo método Rietveld, nas frações retidas a 250 e 325 mesh dos pós de corte (ALC) e britagem (ABC).

% Molar				
Fases	ALC325	ABC325	ALC250	ABC250
Quartzo	66,8(±2,3)	61,1(±3,3)	16,3(±2,1)	76,5(±4,0)
Feldspatos	28,0(±2,1)	35,3(±3,0)	76,4(±3,5)	22,5(±2,2)
Mica	5,2(±0,5)	3,6(±0,4)	7,3(±0,8)	1,0(±0,4)

Em relação ao pó de britagem pode ser observada uma distribuição mais homogênea das frações, porém, o quartzo predomina na fração maior (ABC250) e os feldspatos estão em maior quantidade na fração menor (ABC325). As micas prevalecem na fração menor (ABC325).

Comparando-se os dois processos mecânicos de obtenção dos pós, a quantidade de mica é maior no pó de corte do que no pó de britagem nas frações analisadas. A maior quantidade de feldspatos é obtida na fração retida a 250 mesh no pó de corte enquanto a quantidade máxima de quartzo é encontrada no pó de britagem retido a 325 mesh.

Durante o preparo e manuseio dos pós observou-se que eles apresentam propriedades magnéticas. Como não foi detectado nenhum material magnético na difração de raios X, em razão da sua baixa proporção (0,5% em massa), resolveu-se separar uma parte deste material com o auxílio de um ímã.

Os difratogramas dessas frações dos pós de brita e de corte estão apresentados na figura 51. Identifica-se neles a presença de magnetita, que é o mineral responsável pelas propriedades magnéticas apresentadas pelos pós.

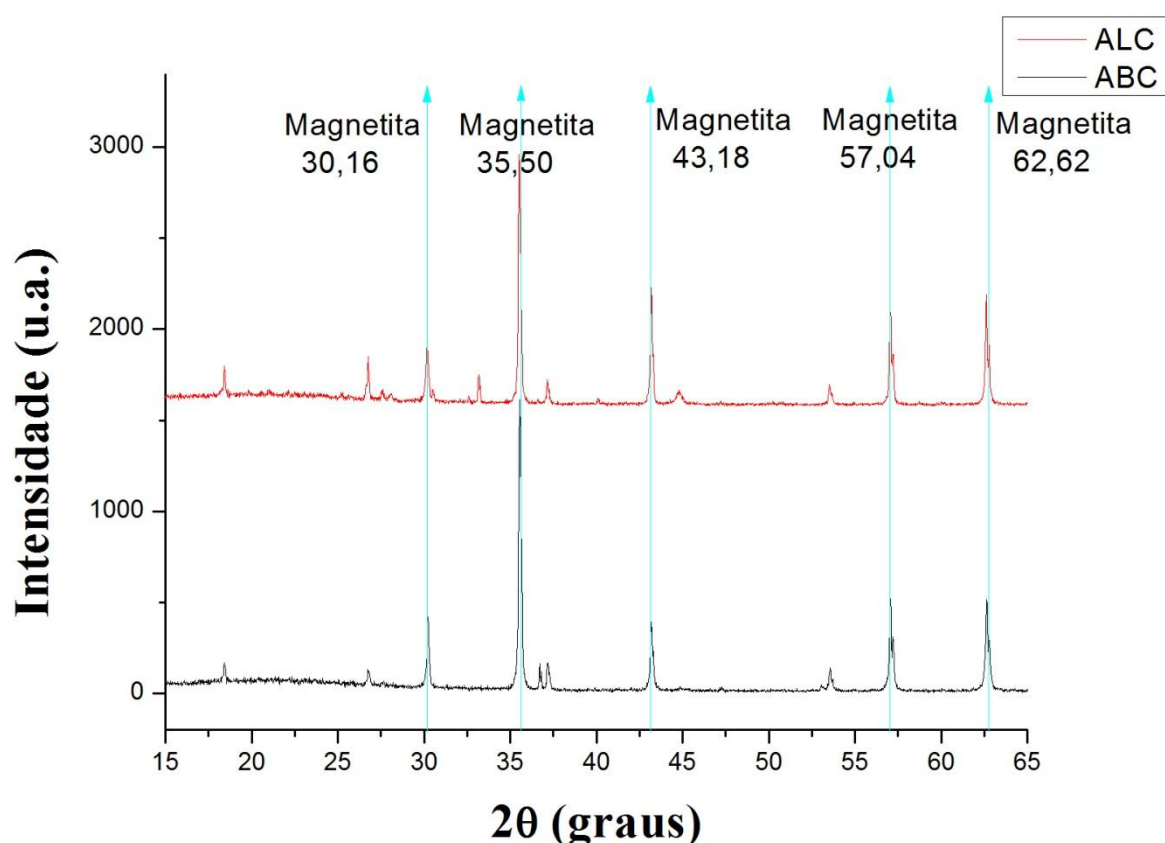


Figura 51: Difrátogramas de raios-X das frações magnéticas dos pós de corte (ALC) e britagem (ABC) retidos a 325 mesh.

4.5. Fluorescência de Raios-X

Os teores dos elementos químicos, de sódio a urânio, presentes nos pós foram determinados utilizando-se o método por análise sem padrões (standardless)^{114,115} e os resultados estão descritos na figura 52.

Os elementos com teor acima de 1% são comuns nos minerais encontrados. Já os elementos com teor inferior a 1% estão associados aos minerais presentes em pequena quantidade nas amostras, que não foram identificados nos difratogramas de raios X, ou estão relacionados à substituição no retículo dos minerais mais abundantes.

Na figura 52 observa-se também que o pó de corte apresenta uma quantidade de ferro superior ao pó brita na amostra retida a 325 mesh. Esse fato está associado à maior quantidade de minerais máficos como a biotita e a magnetita

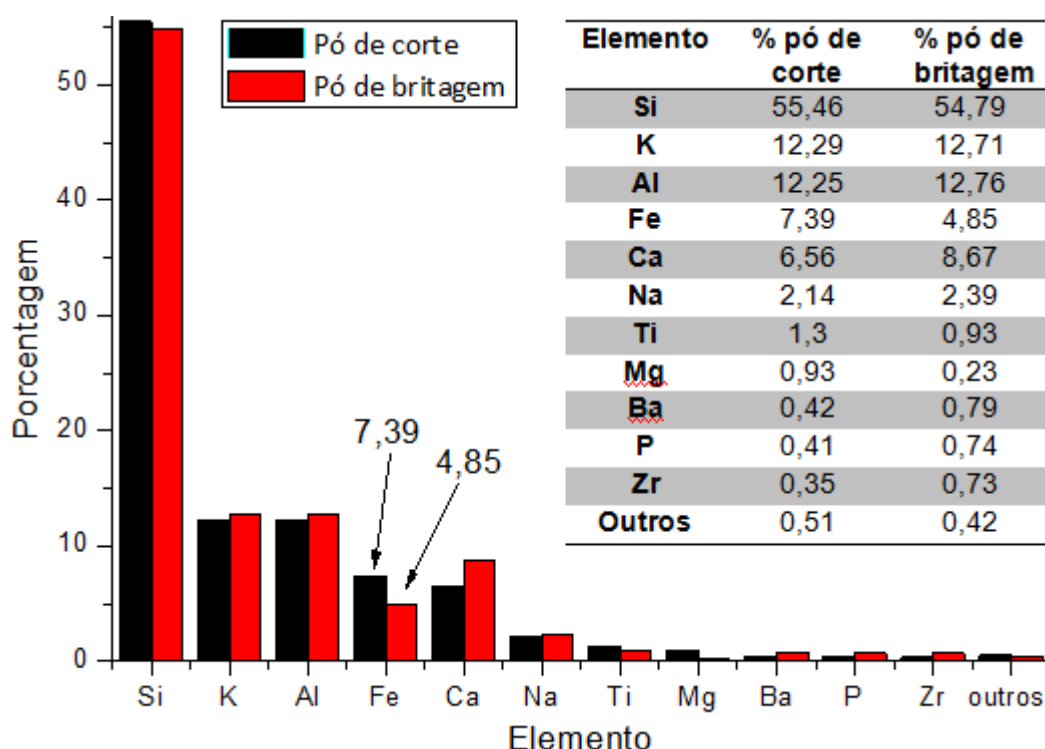


Figura 52: Análise dos elementos de sódio a urânio por fluorescência de raios-X em amostras de pós de corte e britagem do granito Cinza Corumbá.

4.6. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O pós analisados apresentam uma grande variedade de componentes com diferentes propriedades e um estudo morfológico foi feito para analisar a heterogeneidade do material. Resultados obtidos no microscópio de varredura com micro sonda de raios X são apresentados nas figuras 53, 54, 55 e 56.

Foi analisada uma amostra de pó de corte passante numa peneira de 100 mesh apresentando partículas de dimensões menores que 147 μm para enfatizar a heterogeneidade de tamanho e forma das partículas.

Nas figuras 53 e 54, observa-se a presença de partículas com formas bastante variadas, o que está relacionado com os tipos diversos de minerais presentes na amostra. A figura 53 mostra a micrografia obtida em modo SEI enfatizando a morfologia das partículas.

Pode-se verificar, na figura 53, a presença de partículas pequenas aderidas às maiores. O atrito que ocorre entre as partículas pode provocar triboeletrização¹¹⁶ e a adesão entre essas partículas, ocorrendo à formação de agregados que podem permanecer mesmo após o peneiramento¹¹⁷.

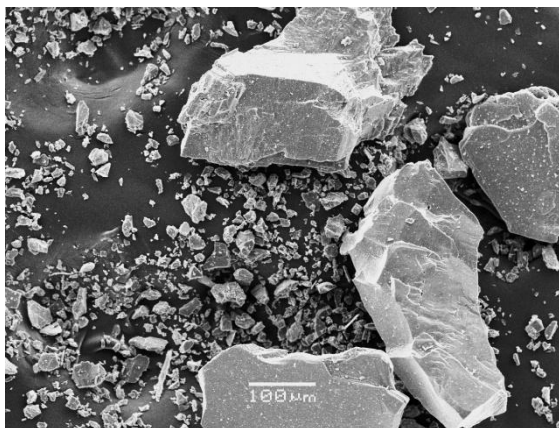


Figura 53: Micrografia do pó de corte do granito Cinza Corumbá passante em peneira 100 mesh obtida em modo de elétrons secundários (SEI).

Na figura 54, a micrografia obtida com imagem de elétrons retroespalhados, da mesma região amostrada na figura 53, apresenta uma uniformidade de brilho uma vez que os principais minerais encontrados apresentam na sua composição elementos que proporcionam um número atômico médio e uma densidade atômica próxima.

As regiões de brilho mais intenso observadas na figura 54 estão relacionadas ao maior número atômico médio dos elementos presentes onde os elétrons retroespalham mais intensamente, como no caso do óxido de ferro em comparação ao quartzo e aos silicatos.

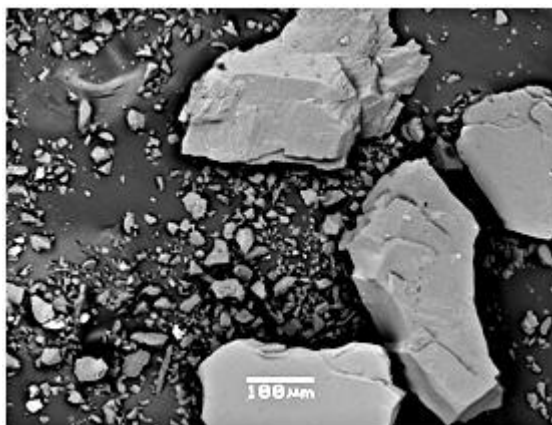


Figura 54: Micrografia do pó de corte do granito Cinza Corumbá passante em peneira 100 mesh obtida em modo de elétrons retroespalhados (BEI).

A figura 55 mostra o espectro de dispersão de energia obtido por microsonda de raios-X acoplada ao MEV da região do pó amostrada nas figuras 53 e 54. Na análise do espectro podem ser observados os principais elementos encontrados na fluorescência de raios-X, descritos na figura 52, bem como elementos relacionados

ao processo de microscopia eletrônica como Au e Pd do recobrimento e C da fita adesiva.

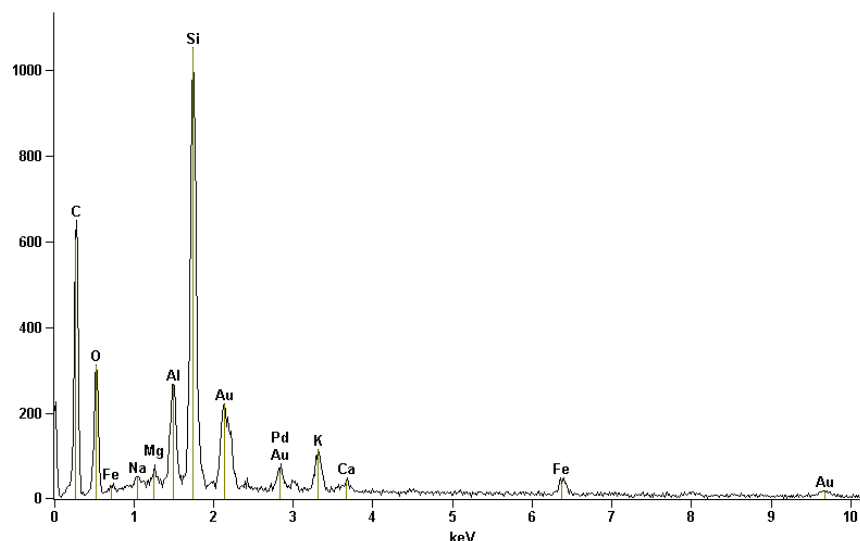


Figura 55: Espectro de dispersão de energia obtido por microsonda de raios-X da região do pó de corte do granito Cinza Corumbá amostrado nas figuras 53 e 54.

Na figura 56 são apresentados mapas de raios X do pó de corte das regiões amostradas nas figuras 53 e 54. As regiões onde prevalece apenas o Si em comparação com os outros elementos estão relacionadas ao quartzo. Nos locais em que o Al está associado ao K e ao Si encontra-se feldspato, onde o Fe está associado ao Mg e Si encontra-se a mica. A região onde o ferro prevalece isolado dos outros elementos mapeados é atribuída a óxidos de ferro como a magnetita.

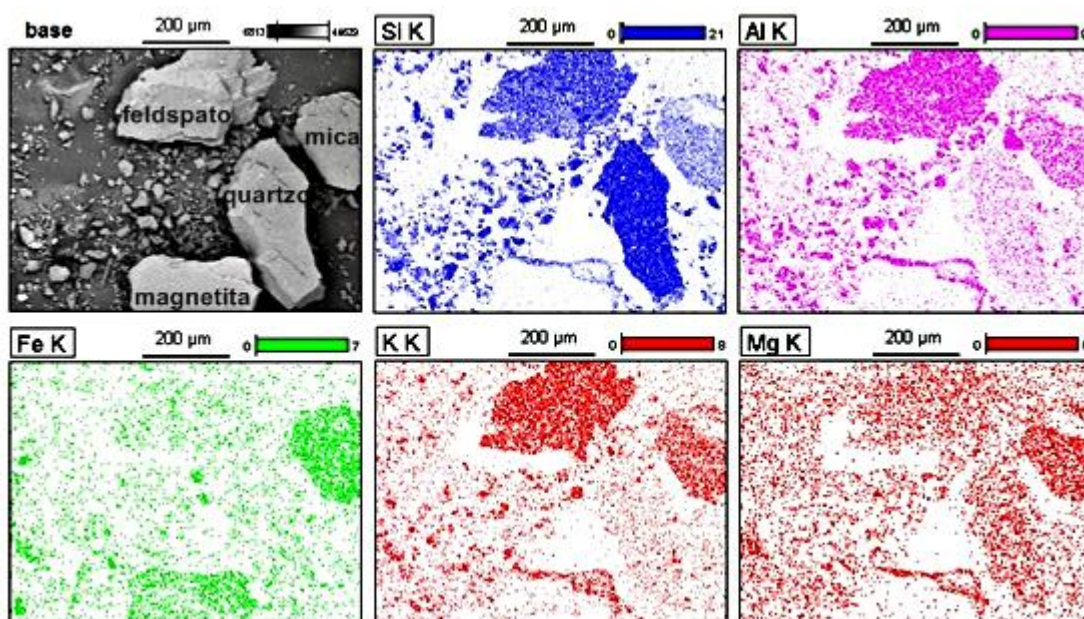


Figura 56: Mapas de raios X da região analisada nas figuras 53 e 54.

A borda da partícula atribuída à magnetita (óxido de ferro) nos mapas de raios-X da figura 56 parece apresentar composição diferente da superfície da partícula, entretanto os sinais de Si, Al, K e Mg devem estar associados à posição do detector em relação a região amostrada e não à composição, pois, além do Mg estar presente em pequena quantidade em relação a possíveis partículas de outros minerais aderidos à borda, também, não se observa a borda da partícula atribuída ao quartzo no mapa de silício devido a posição desfavorável em relação ao detector.

As partículas de feldspato do pó de brita, mostradas nas micrografias da figura 57, apresentam arestas e formas mais irregulares que as partículas do pó de corte das micrografias da figura 58, onde são observados nitidamente o hábito tabular e a clivagem paralela dos feldspatos. Essas diferenças morfológicas são resultado dos esforços mecânicos mais intensos e mais desordenados na britagem em comparação com o processo de corte das rochas

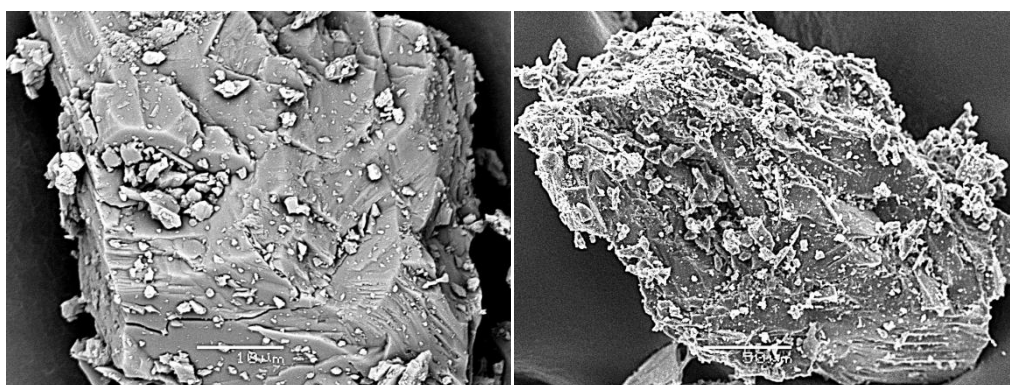


Figura 57: Micrografia de partícula de feldspato do pó de britagem obtida em modo de elétrons secundários (SEI).

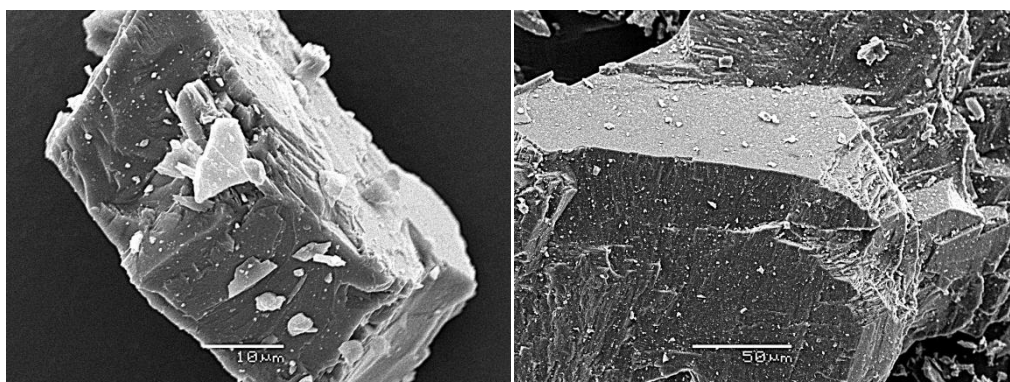


Figura 58: Micrografia de partícula de feldspato do pó de corte obtida em modo de elétrons secundários (SEI)

A figura 59 mostra uma micrografia obtida da fração magnética separada da fração do pó de corte retido na peneira de 325 mesh, obtida em modo BEI,

ressaltando a magnetita (determinada nos difratogramas da figura 51) e pode ser observada uma homogeneidade da região amostrada. Partículas mais escuras estão associadas a minerais não magnéticos como quartzo e feldspatos que não foram separados no processo.

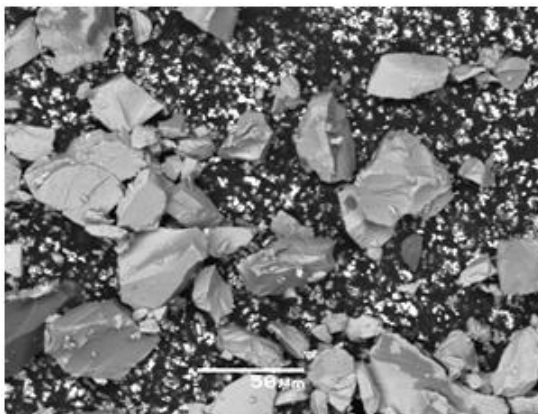


Figura 59: Micrografia da fração magnética do pó de corte do granito Cinza Corumbá obtida em modo de elétrons retroespalhados (BEI).

4.7. Espectroscopia no Infravermelho de Refletância Difusa com Transformada de Fourier (DRIFTS).

Espectros infravermelhos de refletância difusa com transformada de Fourier (DRIFTS) dos pós de corte e britagem são mostrados na figura 60. As absorções em $1100-1200\text{ cm}^{-1}$ são atribuídas ao estiramento da ligação Si-O-Si do quartzo. As absorções ao redor de 1000 cm^{-1} são atribuídas ao estiramento Si-O de silicatos¹¹⁸ presentes na amostra.

O material britado apresentou bandas na região de 2900 cm^{-1} referentes a estiramentos de ligações C-H, atribuídos à contaminação com óleo de lubrificação¹¹⁹ do britador de mandíbulas utilizado.

Uma parte da amostra de brita foi submetida a um processo de extração com hexano para retirada do óleo lubrificante. Após o processo de extração, o pó permanecia hidrofóbico e como pode ser observado na figura 61, que mostra o espectro de infravermelho do pó de britagem pós-extração, ainda há bandas referentes ao estiramento C-H, porém com menor intensidade.

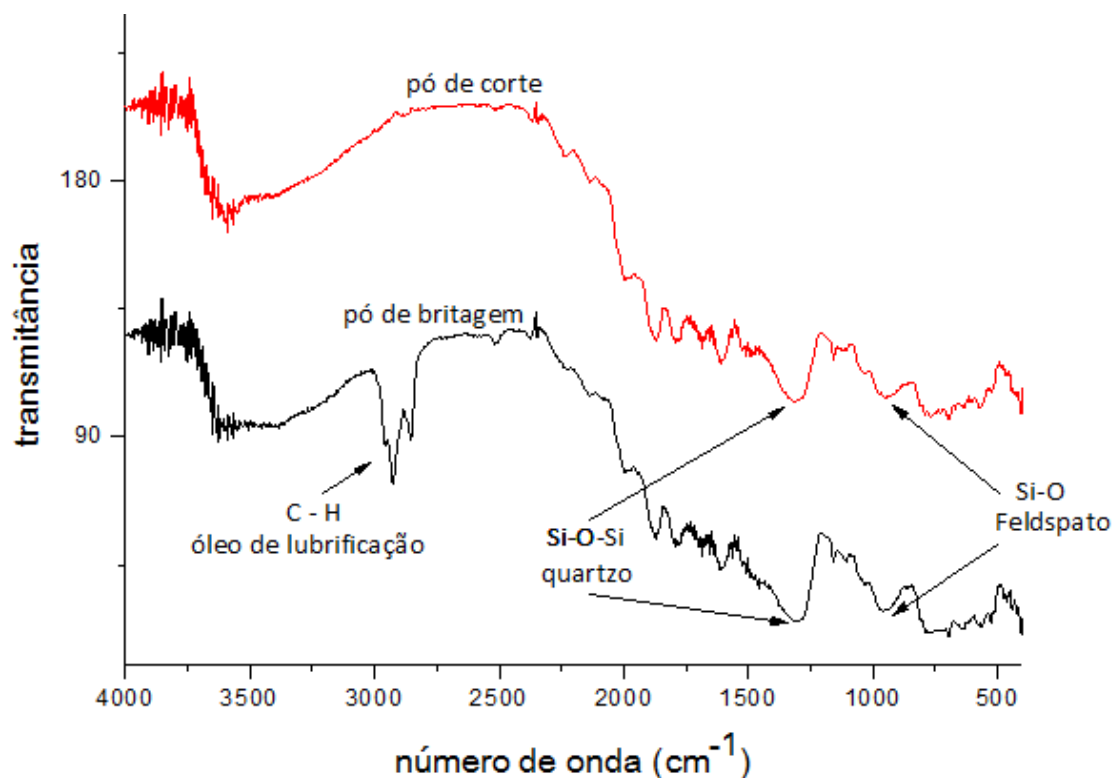


Figura 60: Espectros infravermelhos de refletância difusa com transformada de Fourier (DRIFTS) dos pós de corte e britagem do granito Cinza Corumbá.

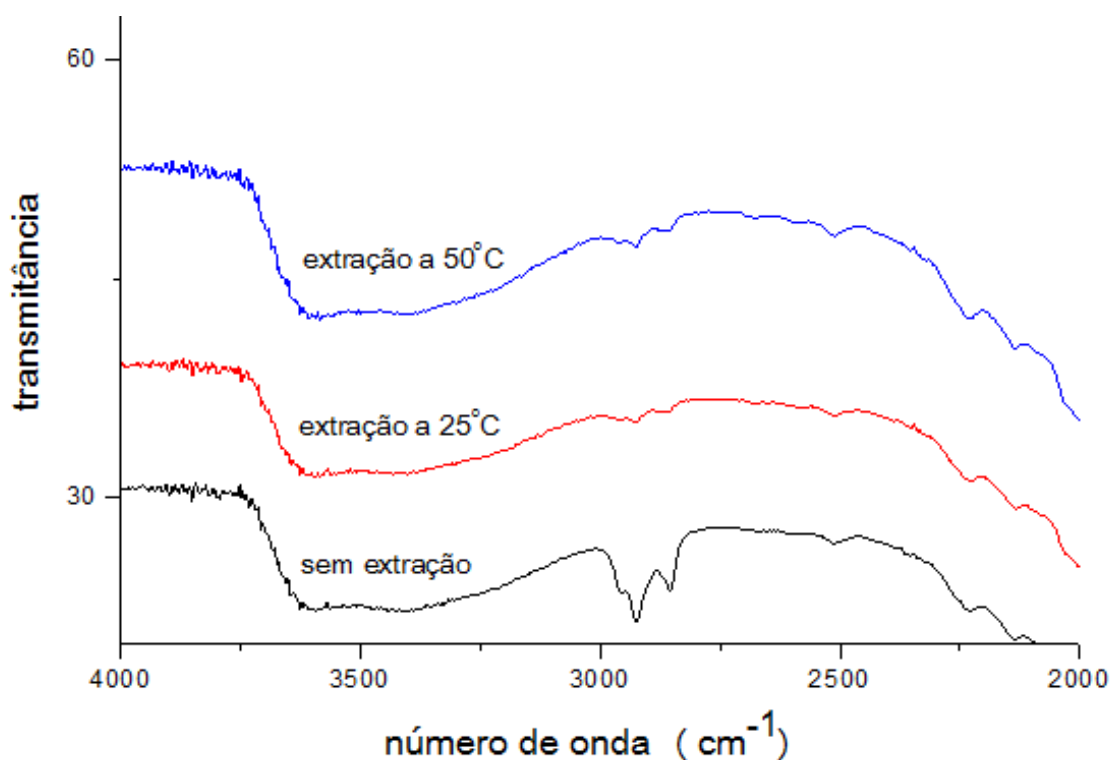


Figura 61: Espectros infravermelhos de refletância difusa com transformada de Fourier (DRIFTS) do pó de britagem de granito Cinza Corumbá com e sem processo de extração do óleo lubrificante.

4.8. Adsorção de Azul de Metileno

As condições de ensaio e as respostas das absorbâncias obtidas no planejamento fatorial 2^2 utilizado no estudo da adsorção de azul de metileno nos pós de resíduos de rochas ornamentais são descritos na Tabela 12.

As granulometrias com partículas de 52 e 67,5 μm de diâmetro médio, foram escolhidas por apresentarem quantidade de amostras suficientes para os ensaios e terem dimensões menores que as outras frações, o que aumenta a eficiência da adsorção. A ação mecânica foi escolhida como segundo fator justamente para estudar o efeito mecanoquímico na capacidade de adsorção dos pós.

A escolha do azul de metileno se baseia no fato que este corante catiônico já é bastante utilizado na literatura em outros sistemas com pós minerais, sendo de fácil aquisição e baixo custo^{120,121}. Além disso, existem estudos da utilização de coletores catiônicos na separação desses minerais por flotação¹²².

Tabela 12: Condições e respostas para o planejamento fatorial utilizado na adsorção de azul de metileno em pós de corte e de britagem do granito Cinza Corumbá.

Plano Fatorial		Fatores		Respostas	
Nível	Nível	Granulometria	Ação mecânica	Absorbância média	Massa adsorvida (mg) por/g de pó
-1	-1	52 μm	Britagem	0,191	2,32
+1	-1	67,5 μm	Britagem	0,836	1,70
-1	+1	52 μm	Corte	2,125	0,46
+1	+1	67,5 μm	Corte	1,578	0,99

Os resultados obtidos em absorbância foram tratados usando o algoritmo Yates¹²³ e os valores dos efeitos são descritos na Tabela 13. O efeito principal relacionado à granulometria das partículas indica, como esperado, que a menor granulometria das partículas favorece a adsorção do corante.

O efeito principal relacionado com o processo mecânico é mais importante que o fator granulométrico, o que está relacionado com a maior área superficial do pó de britagem em relação ao pó de corte, além do recobrimento do pó de britagem pelo óleo de lubrificação do britador.

Pode ser visto ainda, uma contribuição antagônica para a adsorção onde o material de corte é mais eficiente em granulometria maior, o que pode estar relacionado com a proporção entre os minerais que constituem as frações de granulometria diferente, pois, como observado na difração de raios-X, as frações com partículas menores apresentaram maior quantidade de quartzo e menor quantidade de feldspatos que as frações de granulometria maior.

Tabela 13: Resultados dos efeitos do planejamento fatorial 2^2 utilizado na adsorção de azul de metileno em pós de corte e de britagem do granito Cinza Corumbá.

Efeitos	Resultados	Erros \pm
Média	1,513	0,028
1	-0,285	0,056
2	2,025	0,056
12	0,335	0,056

Os resultados da eficiência de adsorção estão descritos na Tabela 14 e indicam que nas condições dos ensaios a adsorção de azul de metileno é aproximadamente 2,5 vezes maior no pó de brita que no pó de corte.

Tabela 14: Eficiência da adsorção de azul de metileno em pós corte e de britagem do granito Cinza Corumbá.

Amostra	Massa de azul de metileno na solução (mg)	Eficiência de adsorção (%)
Solução inicial	2,50	-
Pó de corte (67,5 μm)	1,52	39,2
Pó de britagem (52 μm)	0,18	92,8

4.9. Molhabilidade dos Pós de Resíduos de Rochas Ornamentais

Durante a realização dos ensaios de adsorção, observou-se que o pó de britagem não se dispersava em água como o pó de corte, o que indica que o processo de britagem produz partículas hidrofóbicas necessitando de uma velocidade de agitação maior para facilitar o contato com a água aumentando a interação do sistema¹²⁴. Pode ser observado na figura 62 que o pó de brita fica na

superfície e se aglomera na forma de esferas. A figura 63 mostra que o pó da lama de corte afunda.



Figura 62: Fotografia de topo de um béquer contendo água e pó de brita aglomerado em forma de esfera na superfície do líquido.



Figura 63: Fotografia de topo de um béquer contendo água e pó de corte no fundo do recipiente com o líquido.

Como a densidade dos resíduos estudados é maior que a da água a flutuabilidade ou não dos materiais, observada nas figuras 62 e 63, está relacionada à molhabilidade dos pós. Quando um sólido é molhado por um líquido este o empurra para baixo e a tensão superficial reduz a flutuabilidade, porém, no caso do líquido não molhar o sólido a tensão superficial pode sustentar o corpo na superfície¹²⁵ como pode ser observado para o resíduo de brita na figura 62.

Medidas de ângulo de contato (θ) de pastilhas do pó de corte e de britagem foram feitas com o objetivo de estudar a molhabilidade dos materiais. Utilizou-se o método da gota séssil¹²⁶ e uma representação do ângulo de contato medido está

ilustrada na figura 64. Na prática, se θ é maior que 90° diz-se que o sólido não é molhado pelo líquido, por outro lado, quando uma gota de um líquido se espalha bem sobre um sólido com seu θ tendendo a zero o líquido molha o sólido.¹²⁷

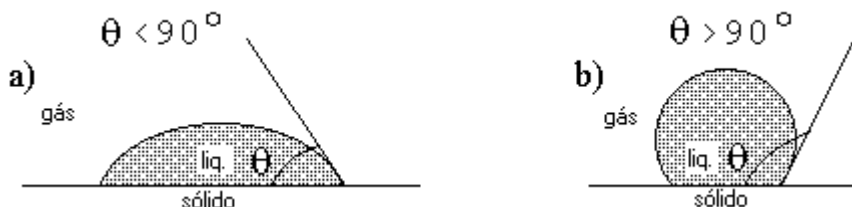


Figura 64: Representação do ângulo de contato na interface sólido/líquido/ar, de uma gota que: a) molha o sólido e b) não molha o sólido.

A molhabilidade depende diretamente do balanço das energias interfaciais sólido-líquido-vapor do sistema. A equação de Young¹²⁵ (equação 5) relaciona as tensões envolvidas quando uma gota está em equilíbrio com uma superfície sólida conforme está representado no esquema da figura 65.

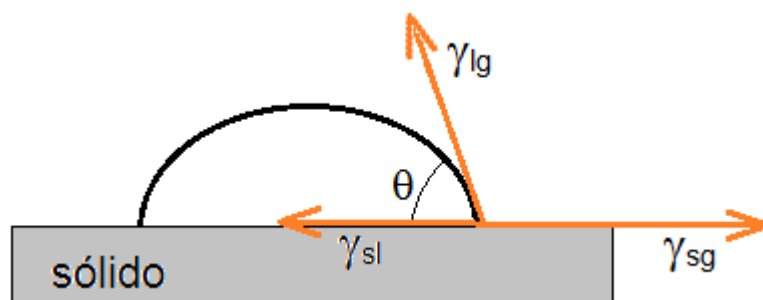


Figura 65: Esquema de tensões presentes no contato de uma gota de um líquido em equilíbrio na interface sólido/líquido/gás.

A tensão superficial do líquido é representada por γ_{lg} , a do sólido γ_{sg} , a tensão interfacial sólido-líquido γ_{sl} , e θ é o ângulo de contato entre o líquido e o sólido.

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cos \theta \quad (5)$$

O trabalho de adesão sólido-líquido (W_{sl}), que é definido como o trabalho reversível, por unidade de área, para separar duas fases que inicialmente possuíam uma interface comum¹²⁵ pode ser relacionado às tensões do sistema gota-sólido através da equação de Dupré mostrada na equação 6.

$$W_{sl} = \gamma_{sg} + \gamma_{lg} - \gamma_{sl} \quad (6)$$

Como as medidas de γ_{sg} e γ_{sl} são difíceis de serem realizadas, determina-se a medida do ângulo de contato (θ) entre a água e o sólido para se calcular o trabalho de adesão sólido-líquido (W_{sl}), ¹²⁵ através da equação de Young-Dupré (equação 7), obtida das equações 5 e 6 ¹²⁸.

$$W_{SL} = \gamma_{lg}(1 + \cos \theta) \quad (7)$$

O trabalho de coesão de um líquido (W_C), que corresponde ao trabalho reversível necessário para separar uma coluna do material, por unidade de área, é dado pela equação 8. Considerando-se para a água a 25°C o valor de $\gamma_{lg} = 72$ mN/m ¹²⁵, calcula-se $W_C = 144$ mN/m.

$$W_C = 2\gamma_{lg} \quad (8)$$

A figura 66 mostra que a água se espalha completamente na pastilha do pó de corte. Portanto, o material apresentou-se altamente hidrofílico (θ - nulo), sendo completamente umedecido, o que concorda com o fato de que nas superfícies dos minerais presentes o molhamento por água é completo e o ângulo de contato da interface ar/água/sólido é nulo ¹²⁹.



Figura 66: Gota de água espalhada na superfície de pastilha do pó de corte do granito Cinza Corumbá.

No processo mecânico de corte, quando a lama é gerada, a água e o pó estão diretamente em contato e assim o efeito Reh binder ^{66,110} se faz presente, diminuindo a energia superficial do sólido e facilitando o corte da rocha pela interação com água deixando a superfície do sólido cortado altamente hidrofílica..

O contato com o ambiente úmido pode também facilitar a clivagem mecanoquímica dos minerais pela ativação da reação de hidrólise da ligação Si-O. Pode haver a formação de grupos silanóis na interface sólido líquido ⁶⁶, o que justifica a alta molhabilidade do pó pela formação de ligações de hidrogênio com a água.

O pó de britagem é obtido a seco e, portanto, a influência da água discutida no caso do pó de corte não é válida. A interação do pó de britagem ocorre com o ar atmosférico e com o óleo lubrificante do britador e gera uma característica

hidrofóbica na superfície do pó que fica recoberta por hidrocarbonetos. Essa interação se justifica novamente pelo efeito Reh binder^{66,110}, diminuindo a energia superficial do sólido.

O recobrimento do pó de britagem pelo óleo lubrificante do britador gera partículas hidrofobilizadas que repelem a água. O baixo molhamento do sólido pode ser confirmado pelo formato da gota de água depositada na superfície de uma pastilha do pó de brita mostrada na figura 67 e pelo ângulo de contato de 138° estimado pelo perfil da gota mostrado na figura 68.

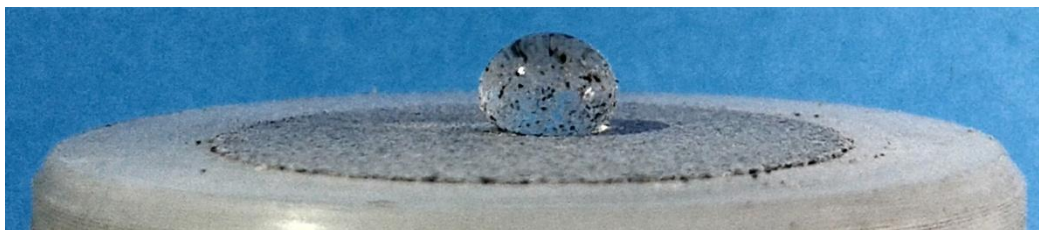


Figura 67: Gota de água na superfície de pastilha do pó de britagem do granito Cinza Corumbá.

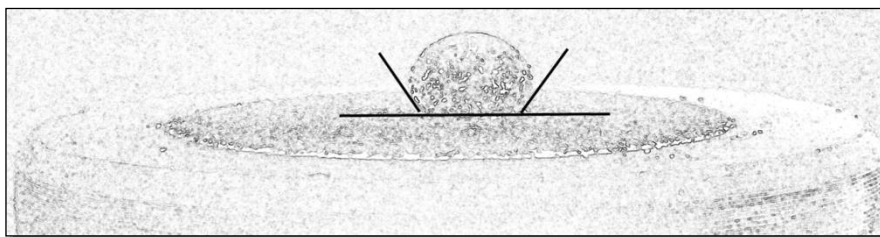


Figura 68: Perfil da gota de água na superfície de pastilha do pó de britagem do granito Cinza Corumbá.

Devido às limitações do método da gota séssil que não leva em conta a rugosidade da superfície da pastilha, nem a porosidade do pó aglomerado, o valor obtido para o ângulo de contato aparente não pode ser usado no cálculo do trabalho de adesão,¹³⁰ porém, indica um baixo molhamento da superfície do pó de britagem pela água.

4. Discussão Final.

O objetivo desta seção é relacionar os resultados obtidos nas análises e ensaios descritos anteriormente e discutir possíveis concordâncias e discordâncias entre eles.

Na Tabela 6 pode ser observado que o pó de corte apresenta densidade maior que o pó de britagem, apesar de serem provenientes do mesmo material. A primeira hipótese levantada para explicar esse fato foi o maior teor de minerais máficos, ricos em ferro, como a biotita cuja densidade varia de 2,8 a 3,4 g/cm³ e a magnetita com densidade 5,10 g/cm³, no pó de corte em relação ao pó de britagem.

Essa hipótese é reforçada pela análise quantitativa das fases minerais presentes nos pós, feita pelo método Rietveld através dos dados de difração de raios-X, cujos resultados podem ser vistos na Tabela 11 e mostram a presença de maior quantidade de mica e feldspatos no pó de corte em relação ao pó de britagem nas amostras de pó retidas a 325 mesh.

Os dados de fluorescência de raios-X também concordam com esta hipótese, uma vez que o pó de corte apresenta maior quantidade de ferro (elemento característico de minerais máficos) que o pó de britagem, como pode ser observado na figura 52. Para testar essa hipótese poderiam ser feitas determinações de densidades da fração retida a 250 mesh dos pós.

É importante enfatizar que as diferenças de composição estão relacionadas com o tipo de processo mecânico de obtenção dos pós, pois, os minerais formadores das rochas, como o granito Cinza Corumbá, têm diferentes propriedades de fratura e clivagem.

Uma segunda hipótese levantada para explicar a menor densidade do pó de britagem em relação ao pó de corte seria a presença de poros internos e fissuras no material menos denso. Através das micrografias mostradas nas figuras 57 e 58 pode se observar uma maior fragmentação das partículas de feldspato amostradas no pó de britagem em relação às partículas de feldspato amostradas no pó de corte. Essa hipótese poderia ser verificada utilizando da técnica de microtomografia de raios-X que permite a obtenção de imagens 3-D da microestrutura dos materiais.

Outra relação importante pode ser observada na comparação dos resultados de adsorção de azul de metileno com a caracterização dos pós. O pó de britagem adsorve mais azul de metileno que o pó de corte que é esperado considerando-se

que a área superficial do pó de britagem é maior que do pó de corte, segundo a Tabela 8.

Além disso, a presença do óleo lubrificante no pó de britagem, indicada pelos ensaios de molhamento e pelos espectros de infravermelho das figuras 60 e 61, podem ter um efeito sinérgico contribuindo para adsorção do pó devido à interação entre as partes apolares do corante com os hidrocarbonetos adsorvidos.

Pesquisas com a adsorção de azul de metileno em argilas naturais e organofilizadas mostraram um aumento de eficiência no processo de adsorção no material modificado^{131,132}. Ensaios de adsorção com corantes mais hidrofóbicos que o azul de metileno, como o Sudam III¹³³, nos pós, também poderiam colaborar no teste dessa hipótese.

Ainda em relação à adsorção de azul de metileno nos pós, um resultado inesperado, levando-se em conta apenas a área superficial, foi obtido no pó de corte que em granulometria maior adsorve mais azul de metileno que em granulometria menor.

Analisando-se os dados da Tabela 11, que mostra o teor dos minerais nas frações do pós, observa-se que a fração mais grossa do pó de corte tem uma quantidade maior de feldspato em relação ao quartzo que a fração mais fina.

Esses resultados sugerem que adsorção de azul de metileno é mais eficiente no feldspato que no quartzo. Esta diferença de adsorção já foi observada em trabalhos de separação desses minérios por flotação¹³⁴. Além disso, essa hipótese poderia ser testada num experimento de adsorção de azul de metileno usando os minerais separadamente.

O pó de corte é hidrofílico, mas a presença do óleo lubrificante, verificada nos espectros de infravermelho das figuras 60 e 61, torna o pó de britagem hidrofóbico.

Entretanto, o que não foi esclarecido é o tipo interação que existe entre o óleo e o pó, ou seja, há apenas uma forte adsorção física (resistente à extração) ou se ocorre uma reação mecanoquímica entre o óleo e o pó do granito, durante a britagem.

Ensaios de XPS (Espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios-X) poderiam colaborar para a análise e resolução dessa questão. As energias de ligação dos elétrons emitidos poderiam ser usadas para verificar se há a formação de ligações do tipo C–O–Si ou Si–C na superfície dos pós que comprovariam a reação química entre o óleo e os minerais presentes no pó de britagem.

5. Conclusões

As amostras provenientes da lama abrasiva do corte e da trituração em britador de mandíbulas dos resíduos do granito Cinza Corumbá apresentaram diferentes distribuições granulométricas prevalecendo partículas maiores no pó de britagem em comparação com o pó de corte.

As frações dos pós retidos na peneira de 325 mesh mostraram uma maior densidade para o pó de corte ($2,73 \text{ g/cm}^3$) comparado com o pó de britagem ($2,58 \text{ g/cm}^3$).a) e área superficial do pó de britagem ($2,85 \text{ m}^2/\text{g}$) é maior que a do pó de corte ($1,98 \text{ m}^2/\text{g}$).

Os difratogramas de raios X mostraram a presença de quartzo, feldspatos (microclínio, oligoclásio, andesina), mica (biotita), titanita e magnetita nos pós de corte e de britagem ensaiados. Porém, na análise quantitativa executada pelo método Rietveld observou-se diferenças nas proporções dos minerais nas frações dos pós e a maior presença de mica no pó de corte em relação ao pó de britagem é um fator que explica a diferença de densidade dos pós analisados.

A fluorescência de raios X mostrou a presença dos elementos Si, Al, Na, K, Ca, Fe, Mg e Ti acima de 1% e também os elementos Zr, Mn, Ba, Sr, F e S, abaixo de 1%.

Através da microscopia eletrônica de varredura observou-se diferenças morfológicas importantes como a ocorrência de arestas e formas mais irregulares no pó de brita em relação ao pó de corte, resultado dos diferentes tipos de ação mecânica.

Nos espectros de infravermelho dos pós foram encontradas absorções atribuídas às ligações Si-O do quartzo e silicatos presentes. O espectro de infravermelho do pó de brita mostrou a presença de óleo de lubrificação.

O pó de britagem adsorve maior quantidade de azul de metileno que o pó de corte. Nos ensaios de molhabilidade, observou-se que o pó de corte é hidrofílico enquanto o pó de britagem é hidrofóbico devido a presença do óleo de britagem.

Os resultados mostram que os pós obtidos por corte e britagem do granito Cinza Corumbá, apesar de serem constituídos dos mesmos minerais, apresentam propriedades superficiais diferentes e o caráter hidrofílico ou hidrofóbico dos pós, determinados nesse trabalho, pode ser decisivo no desenvolvimento de suas aplicações.

6. Bibliografia.

- 1– ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15012: *Rochas para revestimento: terminologia*. Rio de Janeiro, 2013.
- 2 – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C119-14: standard terminology relating to dimension stone. West Conshohocken, 2014.
- 3 – VIDAL, F.V.; AZEVEDO, H.C.A.; CASTRO, N. F. *Tecnologia de rochas ornamentais: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. 700p.
- 4 – VARGAS, T.; MOTOKI, A.; NEVES, J.L.P. Rochas ornamentais do Brasil. *Revista de Geociências*, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2, p. 119-125, 2002.
- 5 – QUICK, G. W. CSIRO. Selective guide to the specification of dimension stone. *Discovering Stone*, p. 8–21, 2002.
- 6 – CARUSO, L.G.; BRAGA, T.O. Granitos e mármore do estado de São Paulo. In: Schobbenhaus, C., Queiroz, E.T., Coelho, C.E.S. *Principais depósitos minerais do Brasil*. Brasília: DNPM, 1991, p. 399-408.
- 7 – BABISK, M.P. *Desenvolvimento de vidro sodo-cáustico a partir de resíduos de rochas ornamentais*. 2009. Dissertação de Mestrado - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2009.
- 8 – KOGEL, J.E.; TRIVEDI, N.C.; BARKER, J.M.; KRUKOWSKI S.T., *Industrial Minerals & Rocks*. 7ª edição. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2006. 1565 p.
- 9 – MENDOZA, J. M. F.; CAPITANO, C.; PERI, G.; JOSA, A.; RIERADEVALL, J.; GABARRELL, X. Environmental management of granite slab production from an industrial ecology standpoint. *Journal of Cleaner Production*, v. 84, n. 1, p. 619–628, 2014.
- 10 – CHIOD, D.K. Síntese do panorama mundial do setor de rochas ornamentais e de revestimento. *Abirochas em Notícia*, São Paulo, v. 1, n. 2, abr./jun. 2015. Disponível em: http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/3539/Abirochas_Noticia_2.pdf (Acesso em 29 dez. 2015).
- 11 – KLEIN, C.; DUTROW, B., *Manual de ciência dos minerais*. 23ª. edição. Porto Alegre: Artmed Editora S.A, 2012. 716p.

-
- 12 – PEREIRA, D.; YENES, M.; BLANCO, J. A.; PEINADE, M. Characterization of serpentinites to define their appropriate use as dimension stone. *Building Stone Decay*, v. 271, p. 55–62, 2007.
- 13 – REIS, R. C. Métodos de lavra de rochas ornamentais. *Revista Escola de Minas*, v. 56, n. 3, p. 207–209.
- 14 – OLIVEIRA, T. *Caracterização do resíduo de serragem de rochas ornamentais para aplicações geotécnicas*. 2015. 145 f. Dissertação (Mestre em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2015.
- 15 – Castro, E.M., A força do setor de rochas Ornamentais [Editorial]. *Revista Rochas de Qualidade*, v. 244, p. 13, 2015.
- 16 – CHIODI FILHO, C. Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS. Informe ABIROCHAS 01/2016. Disponível em: <http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/3609/Informe_01_2016.pdf> consultado em 23 jun. 2016.
- 17 – MELLO, I.S.C. *A cadeia produtiva de rochas ornamentais e para revestimento no estado de São Paulo*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo S.A, 2004. p.129-152.
- 18 – CALMON, J. L.; SILVA, S. A. C. Mármore e granito no Espírito Santo: problemas ambientais e soluções. In: Domingues, A. F., Boson, P. H. G., Alípaz, S.. *A gestão de recursos hídricos e a mineração*. Brasília: Agência Nacional de Águas – ANA, Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM, 2006. p. 199-231.
- 19 – CAMPOS, A. R. et al. Resíduos: tratamento e aplicações industriais. In: Vidal, W. F. H., AZEVEDO, H. C. A. e CASTRO, N. F. *Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento*. Rio de Janeiro: CETEM (Centro de Tecnologia Mineral) e MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação), 2014. p. 431-492.
- 20 – SOUZA, D.V.; VIDAL, F.W.H.; CASTRO, N. F. *Estudo comparativo da utilização de teares multilâmina e multifio no beneficiamento de rochas ornamentais*. Anais da XX Jornada de Iniciação Científica – Centro de Tecnologia Mineral, 4 p., Rio de Janeiro, 2012.
- 21 – MOURA, W.A.; LEITE, M.B. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. *Revista Escola de Minas*, v. 64, n. 2, p. 147–154, 2011.

-
- 22 – CASTRO, E.M. Sustentabilidade do setor de rochas ornamentais. *Revista Rochas de Qualidade*, v. 214, p. 102–112, 2010.
- 23 – GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. A. Review on the utilization of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. *Construction and Building Materials*, v. 102, p. 769–781, 2016.
- 24 – BOGDANOV, R.V.; KUZNETSOVA, R.A.; SERGEEV, A.S.; GLUSHKOVA, V.B.; EGOROVA, O.N. Possibility of incorporating high-level wastes in ceramic matrices based on natural rocks. *Radiochemistry*, v. 36, n. 5, p. 522–531, 1994.
- 25 – BLUM, W. E. H.; HERBINGER, B.; MENTLER, A.; OTTNER, F.; POLLAK, M.; UNGER, E.; WENZEL, W. W. The use of rock powders in agriculture. part ii. efficiency for soil amelioration. *Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung und Bodenkunde*, v. 152, n.6, p. 427–432, 1989.
- 26 – SLYSZ, K. Evaluation of new filtering materials. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, n. 56, v. 8, p.137-140, 1982.
- 27 – LO, H.; HUNG, Y.T. Wastewater treatment. the utilization of earth materials as coagulants. *Journal. Environmental Health*, v. 53, n. 2, p. 22-30, 1990.
- 28 – MERKIN, A. P.; VITEL'S, L. E.; YURMANOV, S. A.; PETROCHENKOV, R. G. Composite PVC-oligomer materials simulating natural stone. *Stroitel'nye Materialy*, v. 1, p. 16-27, p. 1990.
- 29 – ULYBINA, I. M.; CHUGUEVSKA, O. M.; OBUKHOVA, T. M., Activated mineral powder prepn. for asphalt-concrete mfr. - involves grinding and heating of mixt. contg. marble or granite crushing waste and solid coal pitch residue, SU1278322-A, December 23, 1986.
- 30 – GILLOTT, J. E.; JORDAAN, I. J.; LOOV, R. E.; SHRIVE, N. G. Effect of different aggregates on durability of sulfur concretes. *Durability of Building Materials*, v.1, n. 3, p. 255–265, 1983.
- 31 – PIASTA, W.G.; SAWICZ, Z; PIASTA, J. Sulfate durability of concretes under constant sustained load. *Cement and Concrete Research*, v. 19, n. 2, p.216-217, 1989.
- 32 – HAYASHI, H; IMURA, H; UENO, T. Rubber compositions for chains for slip prevention of tires, JP02284936A, November 22, 1990.

-
- 33 – BARRAL SILVA, M. T.; SILVA HERMO, B.; GARCIA-RODEJA, E.; VAZQUEZ FREIRE, N. Reutilization of granite powder as an amendment and fertilizer for acid soils. *Chemosphere*, v. 61, n. 7, p. 993–1002, 2005.
- 34 – DELGADO, J.; FARINA, R.J. Estudio de los residuos de corte de granito ("serrines") en relación con sus características como residuo, su potencial contaminante y aplicaciones prácticas en ingeniería civil. *Revista Real Academia Galega de Ciencias*, v. 24, p. 73-258, 2005.
- 35 – DHANAPANDIAN, S.; MANOHARAN, C.; RAMKUMAR, T. Effect of incorporation of granite and marble rejects in clay brick products: Physico-mechanical analysis. *Acta Physica Polonica A*, v. 118, n. 4, p. 688–695, 2010.
- 36 – CHEN, C. C.; YANG, F. R.; CHANG, J. H. Study on recycling of wastes containing silicon dioxide for fiber cement board. *Kuangye*, v. 51, n. 1, p. 88-97, p. 2007.
- 37 – BERTONI, M., Fabrication of mortar, concrete and refractory material incorporating recycled residue mud from the granite transformation and crushing industry involves adding dry or wet granite mud to dry mortar, mortar, concrete or clay, FR2872156-A1, December 9, 2006.
- 38 – ZHANG, Q.; ZHANG, Z., Artificial composite plate comprises resin, curing agent, accelerator, granite powder, and gravel, CN101357838-A, February 4, 2009.
- 39 – MOSTAFA, A. A.; NOUR, W.M.N.; IBRAHIM, D.M.; ABOU-MAATTY, M. A. Granite wastes as the main constituent in tile Recipes. *Interceram*, v. 57, n. 1, p. 26–30, 2008.
- 40 – NAGAR, R; PATNAIK, A; PAWAR, M. J., Development of erosion wear resistant polymer composite laminate by hand lay-up method, involves incorporating layered structure of carbon fiber as reinforcement and granite powder waste as filler material in structure of epoxy resin, IN201501322-I1, June 26, 2015.
- 41 – RAMA, S.R.; RAI, S.K. Compression, impact and fractographic studies on granite powder-filled HTPU-toughened epoxy composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites. of Reinforced Plastics and Composites*, v. 28, n. 10, p. 1255-1263, 2009.
- 42 – NEPOMUCENO, M.; OLIVEIRA, L.; LOPES, S. M. R. Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral

additions in binary blends of powders. *Construction and Building Materials*, v. 26, n. 1, p. 317–326, 2012.

43 – CALMON, J.L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÊLLO, F.. S. S. ; DA SILVA, S., A. C. ; MATTOS, F. V., Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. *Anais: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas*, v. 2, p. 64-70, 1997..

44 – MENEZES, R. R.; FARIAS FILHO, J.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas (Granite sawing waste recycling for mortar production). *Cerâmica*, v. 55, p. 263–270, 2009.

45 – GONÇALVES, J.P. *Utilização de resíduos de corte de granito para a produção de concreto*. 2000. Dissertação de Mestrado - NORIE/UFRGS, Porto Alegre, 2000.

46 – NEVES, G.; PATRÍCIO, S.M.; FERREIRA, H.C.; SILVA, M.C.. Utilização de resíduos de serragem de granito para a confecção de tijolos cerâmicos. *In: Anais: Congresso Brasileiro de Cerâmica*, v. 1, p. 43-51, 1999, Florianópolis.

47 – MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; LIRA, H. DE L.; FERREIRA, H. C. Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 25, n. 7, p. 1149–1158, 2005.

48 – SILVA, J. B.; HOTZA, D.; SEGADÃES, A. M; ACCHAR , W. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. *Cerâmica*, v. 51, p. 320–332, 2005.

49 – MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N; HOLANDA, J. N. F. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha *Cerâmica*, v. 49, p. 262–267, 2003.

50 – FERREIRA DOS SANTOS, C., Composition for producing ceramic mass and product, preferably bricks, blocks, tiles, filters, pots, benches, floors, and other ceramics, comprises conventional ceramic mass from clay and other wastes, BR102012001431-A2, April 14, 2015.

51 – SILVA, M.A.; PAES JR.,H.R.; HOLANDA, J.N.F., Reuse of ornamental rock-cutting waste in aluminous porcelain. *Journal of Environmental Management*, v. 92, n. 3, p. 936-940, 2011.

-
- 52 – CARVALHO, G.M.X.; MANSUR, H.S.; VASCOCELOS, H.L.; OREFICE, E.R. Obtenção de compósitos de resíduos de ardósia e polipropileno. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 17, n. 2, p. 98–103, 2007.
- 53 – JONES, W.; EDDLESTON, M.D., Introductory lecture: Mechanochemistry, a versatile synthesis strategy for new materials. *Faraday Discussions*, v. 170, p. 9–34, 2014.
- 54 – SINGH, V.; TATHAVADKAR, V.; DENYS, M. B.; VENUGOPAL, R. Application of quartz inversion phenomenon in mineral processing – A case study of siliceous manganese ores. *Minerals Engineering*, v. 32, p. 8–11, 2012.
- 55 – LEE, J. D. *Concise inorganic chemistry*. Londres: Chapman & Hall, 1999. 354p.
- 56 – IWASAKI, H.; TORIKAI, D. Thermal-shock of quartz lascas. *Journal of Materials Science*, v. 28, n.19, 1993.
- 57 – JÚNIOR, R. F. Feldspato-sumario-mineral-2014. *DNPM*, v. 2, n.1 Feldspato, p. 2, 2014. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/feldspato-sumario-mineral-2014>>.
- 58 – BERNASCONI, A.; MARINONI, N.; PAVESE, A.; FRANCESCON, F.; YOUNG, K. Feldspar and firing cycle effects on the evolution of sanitary-ware vitreous body. *Ceramics International*, v. 40, n. 5, p. 6389–6398, 2014. Elsevier.
- 59 – MANNING, D. A. C. Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. *Agronomy for sustainable development*, v. 30, n. 2, p. 281-294, 2010.
- 60 – THENEPALLI, T.; JUN, A. Y.; HAN, C.; RAMAKRISHNA, C.; AHN, J. W. A strategy of precipitated calcium carbonate (CaCO₃) fillers for enhancing the mechanical properties of polypropylene polymers. *Korean Journal of Chemical Engineering*, v. 32, n. 6, p. 1009–1022, 2015.
- 61 – MUNIZ, T.,L. MICA - Sumario-mineral-2014. *DNPM*, n. 61, p. 2012–2013, 2014. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/mica-sumario-mineral-2014>>
- 62 – DEMIR, Z. Tribological performance of polymer composites used in electrical. *Bulletin Material Science*, v. 36, n. 2, p. 341–344, 2013.
- 63 – BALÁZ, P. *Mechanochemistry in nanoscience and minerals engineering*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- 64 – TAKACS, L. The historical development of mechanochemistry. *Chemical Society Reviews*, v. 42, p. 7649–7659, 2013.

-
- 65 – JONES, W.; EDDLESTON, M. D. Introductory lecture: Mechanochemistry, a versatile synthesis strategy for new materials. *Faraday Discussions*, v. 170, n. 0, p. 9–34, 2014. Royal Society of Chemistry. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1039/C4FD00162A>\n<http://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2014/fd/c4fd00162a>>. .
- 66 – MALKIN, A. I. I. Regularities and mechanisms of the Rehbinder's effect. *Colloid Journal*, v. 74, n. 2, p. 223–238, 2012.
- 67 - SOMORJAI, G.A., *Introduction to surface chemistry and catalysis*. New York: Wiley, 1994.
- 68 – BALL, D.W., *Físico química*, São Paulo: Pioneira Thompson Learning, 2006, v.2.
- 69 – CALLISTER JR, W.D., *Fundamentos da ciência e engenharia e de materiais*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008.
- 70 – BERSHTEIN, V.A. *Mekhanogidroliticheskie protsessy v napryazhennykh tverdykh telakh (Mechanohydrolytic Processes in Stressed Solids)*. Leningrad: Nauka, 1987.
- 71 – THIESSEN, P.A.; MEYER, K.; HEINICKE, G., *Grundlagen der tribochemie*, Berlin: Akademie Verlag, 1967.
- 72 – Boldyrev, V. V., *Experimental methods in the mechanochemistry of solid inorganic materials*, Nauka: Novosibirsk, 1983.
- 73 – BALÁZ, P, *Extractive metallurgy of activated minerals*. Amsterdam: Elsevier, 2000.
- 74 – Juhász, Z. A., Opoczky, L., *Mechanical activation of minerals by grinding, pulverization and morphology of particles*, Budapest: Akademia Kiado, 1990.
- 75 – BUJŇÁKOVÁ, Z.; BALÁŽ, P.; ZORKOVSKÁ, A. Enargite concentrate processing by the combination of mechanochemical, hydrometallurgical and precipitation methods. *International Journal of Mineral Processing*, v. 27, p. 28–36, 2014.
- 76 – ACHIMOVIČOVÁ, M.; BALÁŽ, P.; ĎURIŠIN, J.; et al. Mechanochemical synthesis of nanocrystalline lead selenide: Industrial approach. *International Journal of Materials Research*, v. 102, n. 4, p. 441–445, 2011.

-
- 77 – WU, J. Z.; HO, P. C. Evaluation of the in vitro activity and in vivo bioavailability of realgar nanoparticles prepared by cryo-grinding. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 29, n. 1, p. 35–44, 2006.
- 78 – BALAŽ, P.; BALAŽ, M.; ACHIMOVIMCOVÁ M.; BUJŇÁKOVÁ, Z.; DUTKOVÁ, E. Mechanochemistry of solids: New prospects for extractive metallurgy, materials science and medicine. *Acta Physica Polonica A*, v. 126, n. 4, p. 879–883, 2014.
- 79 – SILVA, A.A.S.; SAMPAIO, J.A.; LUZ, A.B.; FRANÇA, S.C.A.; RONCONI, C.M. Modeling controlled potassium release from phlogopite in solution: Exploring the viability of using crushed phlogopite rock as an alternative potassium source in brazilian soil. *Journal of Brazilian Chemical Society*, v. 24, n. 8, p. 1366-1372, 2013.
- 80 – POURGHASHRAMANI, P.; AZAMI, M. A. Mechanical activation of natural acidic igneous rocks for use in cement. *International Journal of Mineral Processing*, v. 134, p. 82–88, 2015.
- 81 – SERTEK, J. P.; ANDRADE, S.; ULBRICH, H. H. An Evaluation of the effects of primary and cross-contamination during the preparation of rock powders for chemical determinations. *Geostandards and Geoanalytical Research*, v. 39, n. 3, p. 381–397, 2015.
- 82 – YUSUPOV, T.S.; KIRILLOVA, E.A., Regulation of the structural and chemical properties of minerals with the help of surface-active agents through fine grinding in centrifugal mills. *Chemistry for Sustainable Development*, v. 17, p. 515–519, 2009.
- 83 – MEDUGNO, C.C. *Mecanoquímica da celulose: efeito de aditivos na moagem e velocidade enzimática*. 1982. Dissertação de Mestrado – IQ/USP: São Paulo, 1982.
- 84 – GALEMBECK, F.; FONSECA VALADARES L.; RIPPEL, M.M.; MURAKAMI, M. M., Production of nanocomposites of thermoplastics from latexes comprises dispersion of clay in thermoplastics, with shearing of the latex based mixture, BR200301193-A, December 21, 2004.
- 85 – BALESTRIN, L. B.S.; DEL DUQUE, D.; SILVA D.S.; GALEMBECK, F. Triboelectricity in insulating polymers: evidence for a mechanochemical mechanism. *Faraday Discussions*, v. 170, p. 369-83, 2014.
- 86 – LUZ, A. B.; POSSA, M. V.; ALMEIDA, S. L. *Tratamento de minérios*. 2ª edição. Rio de Janeiro: CETEM (Centro de Tecnologia Mineral) e MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação), 2002.

-
- 87 - PETERS, K. in Symposium Zerkleinern, Dusseldorf: ed. H. Rumpf – vdi Verlag, 1962, p. 78.
- 88 – ZHAO, B.; WANG, J.; COOP, M. R.; VIGGIANI, G.; JIANG, M. An investigation of single sand particle fracture using X-ray micro-tomography. *Géotechnique*, v. 65, n. 8, p. 625–641, 2015.
- 89 – KING, R .P., *Modelling & simulation of mineral processing systems*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. p. 1–4.
- 90 – CHAVES, A.P.; PERES, A.E.C., *Teroria e prática do tratamento de minérios*. 2ª edição. Signus Editora: São Paulo, 2003, p. 425-509.
- 91 – DEL RIO, L.M.S.; REY, A.R.; CALLEJA,L; ARGANDONARIO, V. G. R. Influencia de los factores propios del sistema de corte. *Materiales de construcción*, v. 48, n. 250, p. 53–59, 1998.
- 92 – IDEMBURGO, K. *Estudo do corte de rochas ornamentais utilizando disco diamantado*. 2012. Dissertação de Mestrado - Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, 2012.
- 93 – TÖNSHOFF, H. K.; HILLMANN-APMANN, H.; ASCHE, J. Diamond tools in stone and civil engineering industry: Cutting principles, wear and applications. *Diamond and Related Materials*, v. 11, n. 3-6, p. 736–741, 2002.
- 94 – YILMAZ, N. G. Abrasivity assessment of granitic building stones in relation to diamond tool wear rate using mineralogy-based rock hardness indexes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 44, n. 6, p. 725–733, 2011.
- 95 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007: *Amostragem de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, 2004.
- 96 – GOMIDE, R., *Operações unitárias*. São Paulo: Edição do autor, 1983, p. 187-215.
- 97 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248:2003: *Composição granulométrica de agregados*. Rio de Janeiro, 2013.
- 98– ADAMSON, A.W.; GAST, A.P., *Physical chemistry of surfaces*, 6 edition, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997, p. 617-621.
- 99 – American Mineralogist Crystal Structure Database. Disponível em: <<http://rruff.geo.arizona.edu/AMS/amcsd.php>> (Acesso em 10 out. 2015).

-
- 100 – DHAHIR, T. A. A. Quantitative phase analysis for titanium dioxide from x-ray powder diffraction data using the Rietveld method. *Diyala Journal for. Pure Sciences*, v. 9, n. 2, p. 108–119, 2013.
- 101 – BLEICHER, L.; SASAKI, J. M.; SANTOS, C. O. P. Development of graphical interface for the Rietveld refinement program DBWS. *Journal of Applied Crystallography*, v. 33, p. 1189–1189, 2000.
- 102 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13242: Determinação de molhabilidade de agrotóxicos e afins. Rio de Janeiro, 2014.
- 103 – SUSANA, L.; CAMPACI, F.; SANTOMASO, A. C. Wettability of mineral and metallic powders: Applicability and limitations of sessile drop method and Washburn's technique. *Powder Technology*, v. 226, p. 68–77, 2012.
- 104 – NOWAK, E.; COMBES, G.; STITT, E. H.; PACEK, A. W. A comparison of contact angle measurement techniques applied to highly porous catalyst supports. *Powder Technology*, v. 233, p. 52–64, 2013.
- 105 – DESTEFANI, A. Z.; HOLANDA, J. N. F. Utilização do planejamento experimental em rede simplex no estudo de resíduo de rocha ornamental como filler para obtenção de máxima compacidade. *Cerâmica*, v. 57, p. 491–498, 2011.
- 106 – WILLS, B.A.; NAPIER-MUNT, T.J., *Mineral processing technolog: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*, 7 edition, Massachusetts: Elsevier, 2006.
- 107 – MORENO, M. M. T.; ZANARDO, A.; ROCHA, R. R.; ROVERI, C. D., Matéria-prima da formação Corumbataí na região do pólo cerâmico de Santa Gertrudes, SP, com características naturais para fabricação de argila expandida. *Cerâmica*, v. 58, p. 342–348, 2012.
- 108 – ALVES, M.S., Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos. 2008. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia/UFMG, Belo Horizonte, 2008.
- 109 – SARDOU FILHO, R.; MATOS, G.M.M.; MENDES, V.A.; IZA, E.R.H.F., *Atlas de Rochas Ornamentais do Espírito Santo*. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2013.
- 110 – HEINICKE, G., *Tribochemistry*. Berlin: Hanser Publishers, 1984.
- 111 – PECHARSKY, V.K.; ZAVALIJ, P.Y., *Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials*, 2 edition. New York: Springer, 2008.

-
- 112 – KATSUKI, H.; KIM, J.; KIM, S.; KIM, J., Influence of alumina content in the raw clay on the sintering behavior of Karatsu ware. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, v. 124, n. 8, p. 833–837, 2016.
- 113 – YOUNG, R.A.; SAKTHIVEL, A.; MOSS, T.S.; PAIVA-SANTOS, C.O., DBWS-9411, an Upgrade of the DBWS: Programs for Rietveld refinement with PC and mainframe computers. *Journal of Applied Crystallography*, v. 28, p. 366–7, 1995.
- 114– JEFFERY, C.H.; BASSETT, J.; MENDHAM, J.; DENNEY, R.C., *Vogel: Análise química quantitativa*, 5ª edição. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A., 1992.
- 115 – SUCIU, I.; PREOTEASA, E.S.; DIMITRIU, B.; AMZA, O.; PERLEA, P.; RADUCANU, A.; TANASE, M.; CONSTANTINESCU, B.; STAN, D.; PREOTEASA, E.A., Potential of standardless x-ray fluorescence analysis of endodontic repair materials using a portable spectrometer. *Romanian Journal of Physics*, v. 60, n. 9-10, p. 1490–1500, 2015.
- 116 – GOUVEIA, R. F.; DUCATI, T. R. D.; BURGO, T. A. L.; REZENDE, C. A.; BERNARDES, J. S.; GALEMBECK, F., Eletrização de dielétricos: novas propostas para resolver velhos problemas. *Química Nova*, v. 33, n. 10, p. 2103–2107, 2010.
- 117 – TONEVA, P.; PEUKERT, W., A general approach for the characterization of orthogonal tRNAs. *Chemistry and Biology*, v. 18, n. 1, p. 39–51, 2007.
- 118 – STARK, P.B.; HERRON, M.M.; MATTESON, A., Empirically minimax affine mineralogy estimates from Fourier transform infrared spectrometry using a decimated wavelet basis. *Applied Spectroscopy*, v. 47, n. 11, p. 1820–1829, 1993.
- 119 – WANG, Q.; YE, J.; YANG, H.; LIU, Q., Chemical Composition and Structural Characteristics of Oil Shales and Their Kerogens Using Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy and Solid-State ¹³C Nuclear Magnetic Resonance (NMR). *Energy & Fuels*, v. 30, n. 8, p. 6271–6280, 2016.
- 120 – SANTOS PEREIRA, A. K. DOS; SCHEIDT, G. N.; SANTOS, L. S. S. Estudo da adsorção do corante azul de metileno em microesferas de quitosana. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, v. 2, n.3, p. 38-42, 2011.
- 121 – BIZZO, H. R.; MARIA, A.; HOVELL, C.; REZENDE, C. M. *Química Nova*, v. 32, n. 3, p. 588–594, 2009.
- 122 – JIE, L.; CHEN, W.; HAN, Y., Study on flotation mechanism of separation of potassium feldspar from quartz with anion and cation mixed collector: advanced

materials research, Volume 826: Powder Technology and Application V. STAFÄ-ZÜRICH: Trans Tech Publications, 2013. p. 106-113.

123 – TEÓFILO, R.F.; FERREIRA, M.M.C. Chemometrics II: Spreadsheets for experimental design calculations, a tutorial *Química. Nova*, v. 29, n. 2, p. 338-350, 2006.

124 – DIEGO, S.; JOLLA, L. Surface tension measurement while stirring . A tool in Unraveling. *Adsorption Kinetics*, v. 36, p. 289–296, 1989.

125– MILLER, C. A.; NEOGI, P., *Interfacial phenomena: equilibrium and dynamic effects*, 2 Edition. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2008. v.139.

126 – ALGHUNAIM, A.; KIRDPONPATTARA, S.; NEWBY, B. M. Z. Techniques for determining contact angle and wettability of powders. *Powder Technology*, v. 287, p. 201–215, 2016.

127 – SHAW, D. J., *Introdução a química dos colóides e de superfícies*, São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 1976.

128 – LUZ, A. P.; RIBEIRO, S.; PANDOLFELLI, V. C. Artigo revisão: uso da molhabilidade na investigação do comportamento de corrosão de materiais refratários. *Cerâmica*, v. 54, n. 330, p. 174–183, 2008.

129 – ARDEBRANT, H. AND PUGH, R.J. Wetting studies on silicate minerals and rocks used in bituminous highways. *Colloids and Surfaces*, v. 58, n. 1–2, p. 111–130, 1991.

130 – ALGHUNAIM, A., KIRDPONPATTARA, S., NEWBY, B. M. Z. Techniques for determining contact angle and wettability of powders. *Powder Technology*, v. 287, p. 201–215, 2016.

131 – ATTA, A. M.; AL-LOHEDAN, H. A.; ALOTHMAN, Z. A.; ABDEL-KHALEK, A. A.; TAWFEEK, A. M. Characterization of reactive amphiphilic montmorillonite nanogels and its application for removal of toxic cationic dye and heavy metals water pollutants. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 31, p. 374–384, 2015. The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry.

132 – MAKHOUKHI, B.; DIDI, M. A.; MOULESSEHOUL, H.; AZZOUZ, A.; VILLEMIN, D. Diphosphonium ion-exchanged montmorillonite for Telon dye removal from aqueous media. *Applied Clay Science*, v. 50, n. 3, p. 354–361, 2010.

133 – PAN, Y.; WANG, J.; SUN, C.; LIU, X.; ZHANG, H., Fabrication of highly hydrophobic organic-inorganic hybrid magnetic polysulfone microcapsules: a lab-

scale feasibility study for removal of oil and organic dyes from environmental aqueous samples. *Journal of Hazardous Materials*, v. 309, p. 65–76, 2016.

134 – VIDYADHAR, A.; RAO, K. H.; CHERNYSHOVA, I. V. Mechanisms of amine-feldspar interaction in the absence and presence of alcohols studied by spectroscopic methods. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 214, n. 1-3, p. 127–142, 2003.

GLOSSÁRIO

Apicoamento – processo que cria uma superfície rugosa por meio da operação básica de “martelamento” regular e repetido sobre a superfície da rocha ornamental (VIDAL et.al., 2014).(3)

Brilho – está relacionado com a aparência geral da superfície do mineral sob luz refletida. Existem dois tipos de brilho: Metálico quando o mineral tem aparência de um metal polido, fosco ou embaçado por oxidação. Não metálico quando o mineral apresenta aparência vítrea, sedosa, perlácea, terrosa ou graxa (com aparência de uma material coberto com graxa). (KLEIN et. al., 2012).(11)

Clivagem – plano preferencial relacionado com a estrutura cristalográfica e com ligações mais fracas que permite que o mineral tenha ruptura preferencial segundo esses planos. (KLEIN et. al., 2012).(11)

Cristal piezoelétrico – são cristais que apresentam a propriedade de gerar corrente elétrica quando submetidos a forças mecânicas. O mais importante cristal natural que possui esta propriedade é o quartzo. (KLEIN et. al., 2012).(11)

Escovamento – processo que cria uma superfície áspera com aspecto envelhecido e por vezes vitrificado por meio da operação com escovas abrasivas de aço ou abrasivos diamantados. (VIDAL et.al., 2014).(3)

Flameamento – processo de acabamento da superfície de rochas ornamentais, utilizando água e maçarico de chama com alta pressão e temperatura da ordem de 1.500°C. Devido a diferença nos coeficientes de dilatação térmica entre os minerais constituintes das rochas, o choque térmico causado pela passagem do maçarico sucedido pela água, provoca o desprendimento dos grãos de quartzo, resultando em uma superfície áspera com aspecto rústico. (VIDAL et.al., 2014).(3)

Fratura conchoidal – ou fratura concóide de um mineral ocorre quando as superfícies formadas após a ruptura de um mineral de composição homogênea como o quartzo apresentam aparência de conchas (KLEIN et. al., 2012).(11)

Hábito – é a forma ou conjunto de formas que um mineral pode assumir. Como exemplos podem ser citados o hábito tabular dos feldspatos e o hábito lamelar das micas. (KLEIN et. al., 2012).(11)

Materiais Lapídeos – rochas aplicadas em revestimento de túmulos e jazigos. Esse tipo de revestimento é frequentemente chamado de arte funerária. (KOGEL et. al., 2006).(8)

Micaxisto – rocha metamórfica foliada formada essencialmente de quartzo e mica com hábito lamelar das micas. Pode apresentar minerais acessórios tais como feldspato, granada, anfibólio e andaluzita. (KLEIN et. al., 2012).(11)

Pedras naturais – rochas aplicadas em revestimento que não passam por processo de beneficiamento como polimento ou dimensionamento em chapas que são extraídas das jazidas e aplicadas diretamente como o basalto e calcário em calçadas. (KOGEL et. al., 2006).(8)

Pegmatito – rocha ígnea de granulação grosseira com cristais medindo comumente 30 cm ou mais. (KLEIN et. al., 2012).(11)

Rochas de cantaria - material rochoso entalhado manualmente com ferramentas rudimentares. (KOGEL et. al., 2006).(8)

Rochas dimensionadas – rochas ornamentais que passaram por processo de corte e desdobramento de blocos em chapas. (KOGEL et. al., 2006).(8)

Rochas sintéticas - materiais sintéticos aglutinados por resinas de poliéster e que possuem no mínimo 90% de rochas naturais como granito, quartzo ou mármore. São comercializadas como rochas sintéticas ou pedras industrializadas. (KOGEL et. al., 2006).(8)

Saprólitos – são as estruturas limites entre o solo e as rochas. São formados por rochas decompostas por intemperismo químico para um material argiloso, facilmente fragmentado, de cores amarelas a avermelhadas ou em tons de cinza, dependendo da rocha original e do clima. Os saprólitos graníticos são formados pela decomposição de granitos e contêm grande quantidade de quartzo e outros minerais resistentes à alteração. (KLEIN et. al., 2012).(11)

Textura – a textura de uma rocha refere-se ao tamanho, forma, disposição, contatos e organização dos minerais formadores da rocha. (KLEIN et. al., 2012).(11)

Textura granular – ou fanerítica, os cristais da rocha são visíveis macroscopicamente. Característica de rochas plutônicas (proveniente do resfriamento do magma) formadas pelo esfriamento lento do magma como granito, gabro e diorito. (KLEIN et. al., 2012).(11)

Textura sacaróide – textura na forma de grãos semelhantes ao açúcar cristalizado, característica de rochas sedimentares como o arenito. (KLEIN et. al., 2012).(11)